

当面する物質移動の課題

天谷孝夫*, 長堀金造*, 三野 徹*

Major problems of mass transport
Takao AMAYA, Kinzo NAGAHORI, Toru MITSUNO
Faculty of Agriculture, Okayama University

I はじめに

除塩とは、土粒子に吸着されていたり、土壌溶液中に含まれている塩またはイオンが、水の動きと共に土層系外へ運び去られるという、物質移動の一現象と捉えられる。これまで、我国の干拓地はすべて水田に利用されてきたため、除塩問題については水田利用の観点からの研究が進められてきた。しかし、海面干拓地を営農開始当初から畑地として利用すべく事業が進められてきた笠岡湾干拓地では、畑地利用の除塩に関わる多くの課題への対応にせまられている。特に、耐塩性の低い畑作物でも正常な生育が可能な程度にまで除塩を遂行すること、次第に改良が進む畑土層状態を将来にわたり維持し続けることをあわせ行うことが強く求められる。このように、広い意味での除塩対策を検討していく段階で直面した多くの問題点を整理すると、以下に述べるように物質移動の諸課題と密接な関わりを有することがわかった。つまり、笠岡湾干拓地は多くの分野において発生する物質移動の問題が凝縮して存在するフィールドと捉えられる。このような観点から、研究は現在も継続中であるが、本報告では笠岡湾干拓地の除塩問題を通して、広く土壌中の物質移動に関する当面の課題整理を試みるものである。

II 笠岡湾干拓地における除塩問題

笠岡湾干拓地の概要は図-1に示すように、本土と神島とを東西の堤防で区切り、農業用地 1,191 ha を造成する単式干拓地である。用水は遠く高梁川から延長約 24 km の導水路で送られ、灌漑および除塩関連用水量は限られており、また温暖乾燥な瀬戸内気候のため塩に由来する畑作物障害がけなされる。全域の干陸は、昭和52年8月に完了したが、それより早く図-1に示す位置に 20 ha の試験圃場（昭和52年初頭に干陸）を設定し、各種調査を継続してきた。笠岡湾干拓地土壌は、粒径 0.02 mm 以下の微細粒子を80~90%含有し、干陸時には海水

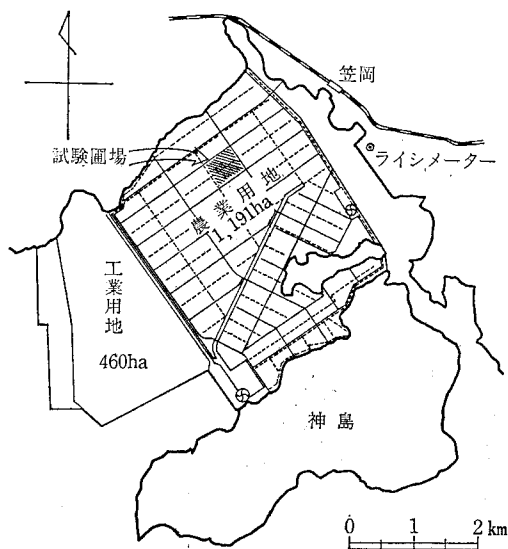


図-1 笠岡湾干拓地の概要

に起因する高濃度の塩を含んでいた。干陸後の試験圃場では、一般的な干拓地地区内工に準拠した圃場乾燥工ならびに暗渠排水工が施工された。また、特別な土壌改良が実施されたことはなく、調査は裸地状態で行われた¹⁾。土層の乾燥ならびに除塩は、干陸後しばらくは時間の経過と共に進行したが、次第に下記の問題が生じた。

その1は、除塩に伴う土壌物理性の悪化であり、含水比と乾燥密度の経年変化を図-2からみると、干陸後3年間は順調に乾燥が進行したが、4年目（昭和55年）に停滞現象が発生して以降、乾燥化が困難となってきた状況がうかがえる。そこで、含水比 (W) と乾燥密度 (γ_d) との関係を昭和53, 56, 58年にかけてみると図-3の通りである。気相がなく、固相と液相のみの土層状態を表す関係曲線 $\gamma_d = 100 / (W + 37.3)$ よりずれ始める含水比、すなわち空気が侵入し始める点が、53年は90%弱であったのが、56年は80%弱、58年は60%弱と次第に低下

* 岡山大学農学部

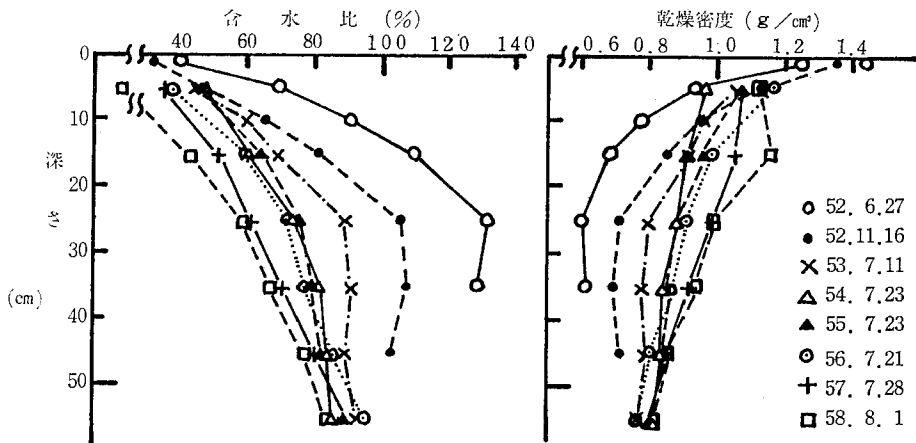


図-2 笠岡湾干拓地試験圃場における干陸後の含水比、乾燥密度の経時変化

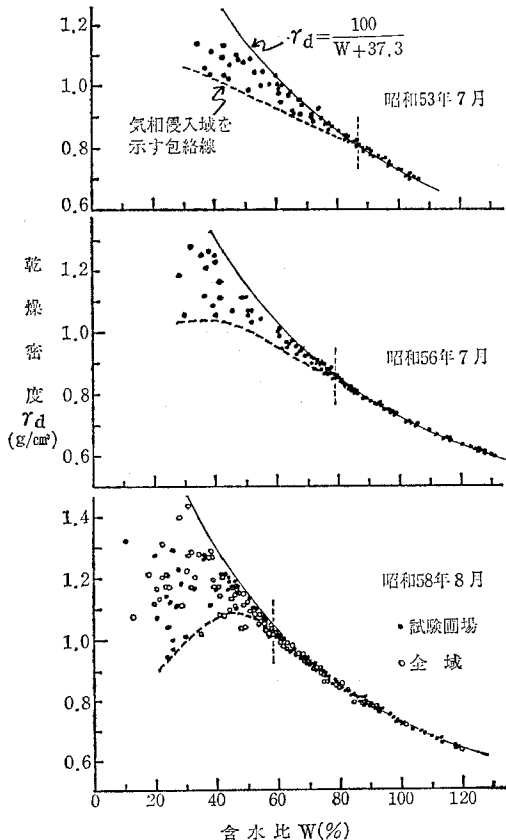


図-3 笠岡湾干拓地干陸後の含水比—乾燥密度関係の変化

したことがわかる。しかも、この含水比に相当する深さは、図-2から判断すると順に45 cm、40 cm、25 cmと浅くなってきた。これは、表層から次第に除塩が進行してきた一方、吸着イオン構成比がNaに偏った(高ESP値)ままだから土は分散状態となり、さらに乾燥が進む

につれて土は無構造の密詰化状態になったものと考えられる。

その2は、図-4にみるように除塩の進行が次第に停滞してきたことであり、5年目(昭和56年)は前年とまったく変わらず上層から下層へと一直線の塩濃度分布となり、以降の変化も微少であった。作物の生育も不良であり、根群域を中心とした除塩の促進が急務となっている。

III 土壌物理性の悪化の機構

土壌物理性の悪化は、除塩の進行に伴い土壌溶液の濃度が低下して、Na粘土特有の分散反応が強まったことにより生じたものであり、以下の現象をもたらした。

1. 塩濃度(CEc)と交換性Naの割合(ESP)との関連からみた粘土の挙動についての模式図(図-5)²⁾から明らかなように、除塩の進行(CEcの低下)に伴いESP値が低下しないと、土は凝集領域から膨潤・解膠領域へと移行し、分散状態にいたる。

2. 団粒構造の破壊。一般に、土の分散化と共に団粒構造が破壊され、壁状構造になるといわれている。図-3において、実線で示される気相率ゼロの曲線は壁状構造の特性を示すものであり、この図から判断すると、壁状構造が現われる深さは経年的に浅くなってきている。これより、団粒構造の破壊が生じているものと判断できる。

3. 透水性の低下。図-6は、透水係数に対するNa飽和度(ESP)の影響をみたもの³⁾で、除塩と共に土壌溶液濃度が低下しても、ESPが低下しなければ透水係数は小さくなることを示す。

4. 膨潤に伴う自由水の減少。除塩が進み土壌溶液濃度が低下すると拡散二重層が発達し、体積が拘束された条件下では、図-7⁴⁾に示すように膨潤圧が増加する。

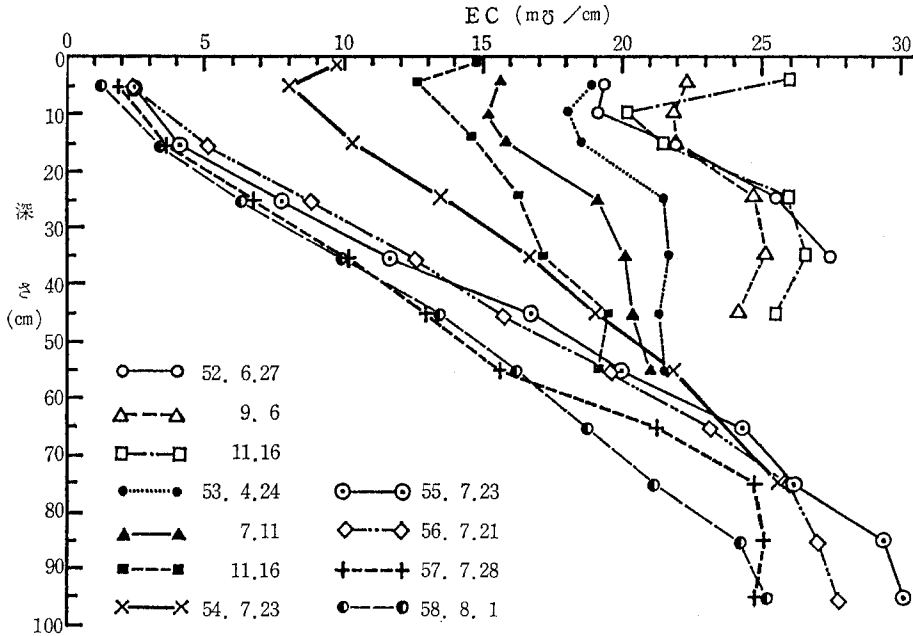


図-4 笠岡湾干拓地試験圃場における干陸後の塩濃度分布の経時変化

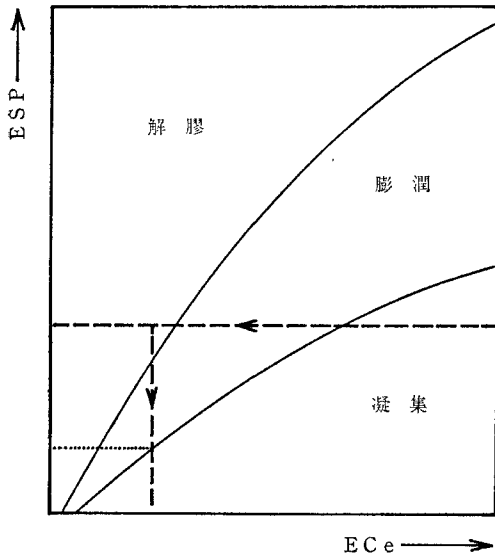


図-5 ESP と ECe との関連からみた粘土の挙動についての模式図 (Bolt ら(岩田ら訳))

体積が完全に拘束されていない圃場の状態では、土壤水の一部は膨潤水としてとりこまれ、非自由水となる。さらに、それに伴って空気が侵入し、気液界面の自由エネルギーに基づくマトリックポテンシャルが発達して、土壤水の自由エネルギーは同じ含水比の下でも小さくなる。すなわち、膨潤に伴って重力ポテンシャルの地位の相対的低下ならびに自由水の減少が生じる。したがって、重力により動く水が少なくなって、それにより運搬される物質移動量の減少がもたらされる。

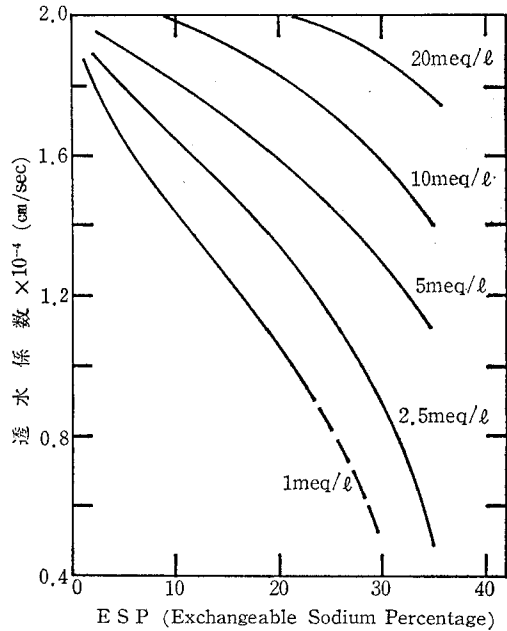


図-6 Sawyers 土の透水性係数に対する Na 飽和度の影響 (Quirk, 1957)

IV Ca粘土化による土壤物理性の改善

1. 石膏 (CaSO₄) 施用による Na イオンの Ca イオンとの置換

図-5の凝集-解膠(分散)関係から明らかのように、悪化した物理性を改善するためには、ESPを低下させることが最も重要であり、それが図-8⁵⁾で典型的

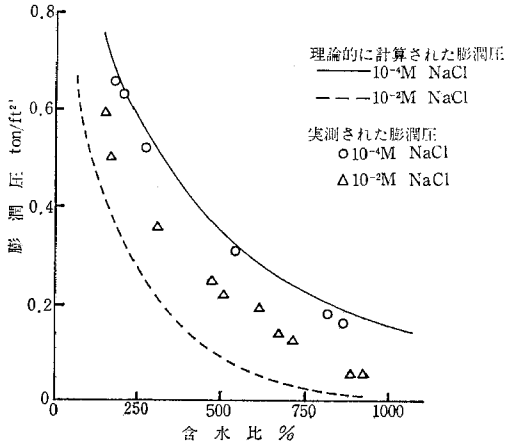


図-7 Na-モンモリロナイトの膨潤圧の計算値と実測値の比較 (Warkentinら(山崎ら訳))

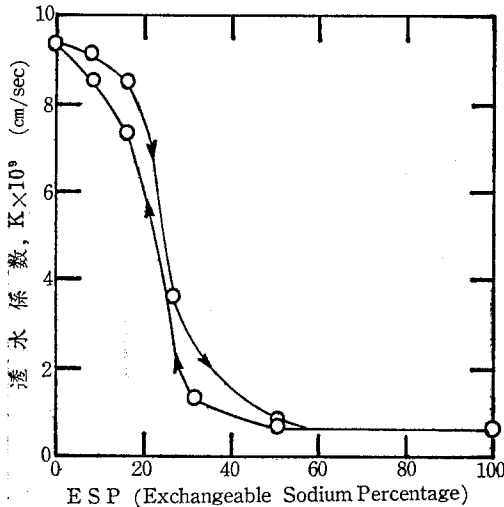


図-8 全塩濃度 0.01 M における粘土膜の透水係数と ESP の関係 (Shainberg and, Caiserman, 1970)

に示されるように透水性の増加や、あるいは水分特性曲線の改善等をもたらすため、Ca 粘土化が要求される。改良材としては石膏が最も実用的であり、現場的には適切な作業機械により、できるだけ深層まで均一に石膏を混入する必要がある。また、機械による耕うん混入が不可能な下層部は、灌漑水により石膏を溶解させて導き、置換を促進させることが望ましい。

2. 土壌水の運動とイオンの移動

土壌中のイオンの動きを考えると、一つには間隙中を動く水によりイオンが輸送される場合があり、亀裂による物質移動もこれに含まれる。A イオンの間隙内にお

ける 1 次元溶質濃度変化を与える次式は、この関係を示すものである。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C_A) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial (q C_A)}{\partial x} + S$$

ここで、 θ : 体積含水率、 C_A : 溶質濃度、 D : みかけの拡散係数、 q : 土中水のフラックス、 S : 土粒子に吸着される溶質の量で $S = -k_a C_A^N$ (k_a : 吸着速度係数、 N : 定数)

これは、イオンの吸着反応よりは、間隙内の移動に着目した式で、不活性な砂礫層中の比較的速い水流 (地下水流動) を対象とするものである。

3. 土壌水の状態とイオンの挙動

吸着反応に基づくイオンの挙動を重視する立場があり、これを示すものとしては、次の A イオンの 1 次元物質保存式がある。

$$\frac{\partial (Q_A + \theta C_A)}{\partial t} = -\frac{\partial (q C_A)}{\partial x}$$

さらに吸着平衡式は

$$Q_A = Q_A(C_A, C_{an})$$

$$\frac{Q_A}{(CEC - Q_A)} = \frac{K C_A}{(C_{an} - C_A)^{1/2}}$$

ここで、 Q_A : A イオンの吸着相中の量

C_{an} : 全 (又は陰イオン) 溶液濃度

K : ガボン常数

これは、吸着反応を重要視して、拡散・分散現象を無視したものであり、粘土中の物質移動を扱うには、この関係を重視すべきであると考えられる。そして、CEC や K を介することにより、土壌化学との接点が見出される重要性を有するという特長をもつ。

4. 浸透水 (降雨 + 灌漑水) による ESP コントロール

石膏の混入が不可能な下層部に対しては、石膏を溶解させた浸透水により、目標とする土壌物理性が維持できるように ESP にコントロールする必要がある。

V 除塩の停滞

図-4 にみられる、笠岡湾干拓地での除塩の停滞について検討を行った。

海外の乾燥地域において得られた従来の除塩理論によると、間隙中を水が移動すると共に着実に除塩が進行するというものである。しかし、昭和52年初頭の干陸以降の試験圃場においては、除塩対象土層深を 1 m まで過大にとったとしても、停滞までの 4 年間の降雨量は全間隙を何回も置き換えるに十分な水が通過した計算となる^{*}。従来の除塩理論では停滞の原因を説明できないことから、以下のように考察を進めた。

^{*} 昭和56年の実測 (長畑ら; 笠岡湾干拓地の蒸発散量, 昭和58年度農学会大会講演要旨集) によると、降雨量は 949 mm、蒸発量 (熱収支法) は 652 mm で、平組地であることから、その差 297 mm はほとんど暗渠から流出していると考えられる。

それは、水移動の難易度から土壌間隙を区分し、除塩の停滞を説明しようとするものである。すなわち、新鮮な水の入れかわりが可能かどうかによって、除塩の可能性が決定されると考える。pF 1.8^{*} 以上の大間隙は、水による置換が可能であるから除塩も容易に進むが、pF 1.8 以上だと微細な間隙となる程水の置換が困難となって、塩も移動しなくなるだろうという説明である。そして、塩移動の困難さは、対象土壌に特有の間隙構造によって大きく変化する。

日本のような湿潤地帯では、重力水による下方へのフラックスが常に存在しており、微細間隙は常に重力によっては動きえない水で満たされている。したがって、下方へのフラックスにより除塩をはかろうとする乾燥地帯の除塩理論は、湿潤地帯では適用できない。気象と土壌特性によって形成される、地域固有の土壌水循環構造（重力によって動く水、蒸発によって動く水、まったく動かない水の割合と運動状況）が、湿潤地帯の除塩理論の中では基本的な役割をはたすといえる。つまり、湿潤地帯ではこれらの要因によって除塩の段階が規定されるわけである。以上の考え方に則り間隙区分をすると、pF 1.8 以下の大間隙は、重力排水と蒸発散との含量により水が排除されるから、置換可能な水量も多くなる。一方、pF 1.8 以上だと蒸発散のみによってしか間隙は空かない、つまり置換しよう量は蒸発散量により決まってしまう。したがって、一定の蒸発散能により少しでも下層までの置換をはかるなら、耕起等による乾燥化の助長をもたらすことが重要となろう。

VI まとめ

1. 土壌中では、イオンの吸着状態による物性変化により水理定数が変化し、そして水の移動状況が変化する。その結果、イオンの吸着状態が変化するという因果循環が発生し、現象を複雑にする。膨潤土は、これらの現象が典型的にあらわれる対象である。
2. 土壌中の物質移動には、土壌水の運動とイオンの可動化が必要となる。物質移動は、両条件が満たされて初めて具体的に生じる。粘土を含む一般の土では、土壌水の運動と状態により両条件が微妙に変化し、両者からのアプローチが重要となる。
3. 自然状態では、土壌中の水循環の構造が土壌中の物質移動の決定的な枠組みを与える。
4. 土壌中の物質移動は、これまでの土壌物理研究の総合化の上に、物理化学の面の研究の補強を必要とする。

本報は、笠岡湾干拓地での除塩問題への対応の過程で

明らかとなってきた諸問題を通して、主に既報のデータを基に現在の諸研究の位置付けを試みたものであり、当面する物質移動の課題に関する理解の一助ともなれば幸いである。

引用文献

- 1) 長堀金造, 天谷孝夫, 高橋 強: 干拓ヘドロの基礎的諸特性と除塩機構について, 農土論集 101, pp. 15~25 (1982)
- 2) Bolt, G.H. and M.G.M. Bruggenwert (岩田ら訳): 土壌の化学, 学会出版センター, p. 202 (1980)
- 3) Quirk, J.P.: Effect of electrolyte concentration on soil permeability and water entry in irrigated soils, Internat. Conf. on Irrig. and Drainage, 3rd Congress R6 Questions 8, pp.115—123 (1957)
- 4) Yong, R.N. and B.P. Warkentin (山崎ら訳): 土質工学の基礎, 鹿島出版会, p. 158 (1972)
- 5) Shainberg, I. and A. Caiserman: Studies on Na/Ca montmorillonite systems. II, The hydraulic conductivity, Soil Sci. 111, pp. 276—281 (1971)

質疑応答

岩田 (農士試) わかりにくかったので、少し、補足して頂ければと思う。乾燥地帯の除塩の問題と湿潤地帯の除塩の問題の違い、つまりそのメカニズムの違いについてももう少し、具体的に話していただきたい。

天谷 乾燥地帯の除塩の考え方は、降雨が蒸発量より少ないので、灌漑水を与えるとそれが下の方向へ浸透して行き、いわゆるピストンの除塩が進むというものである。そのピストンも何割きいてくるのかというと、洗脱効果係数からみると、それが例えば砂質土でしたら0.6で、粘質土だったら0.3という値をとるとすると、絶対的に塩がなくなってしまうということはないだろうけれども、その間隙を全部水で満たして、下方へと通過していくならば、粘質土でしたらそのうちの0.3がきいてくる。その0.3の繰り返しで除塩を進行させて、非常にすみやかに除塩が進むのではないかと理解しました。これに対し、湿潤地帯においては土が湿っており、間隙区分からみて、大きな間隙中の水は、重力でぬけてしまう。一旦ぬけてしまうと、大きな間隙の除塩は終わってしまう。そして、それより細かい間隙においては、そこに塩が溶出してきて、それが間隙から外へ押し出されてはじめて除塩が可能になる。つまり細かい間隙から水が移動しなければ、除塩が進まない。けれども、実際にはそれが動きえないという状況があるかと思う。それが湿潤地帯だから、いつも湿っているのだから、新しい水が入ってこ

* ここでは、pF 1.8 に相当する含水比を、重力によって動きうる水と動かない水との区分点と考える。これは、いわゆる圃場容水量である。

れない状況になる。それを打破しなければ、湿潤地帯においては、新しい水が入ってこないために除塩は進まないと考えた。

相馬（北海道大） 除塩に伴う、団粒構造の破壊について、含水比と乾燥密度との関係をプロットした図（図-3）において、特にゼロ空気間隙量曲線からずれてくる含水比が、年次の経過とともに、90, 80, 60と変わってきている。そのようなことと団粒構造の破壊ということとをどのように結びつけるのか。また、石膏を散布したのは、先に述べた3つの年次で出された含水比と乾燥密度との関係の中に入っているのかどうか。

天谷 含水比と乾燥密度の関係が経年的に、ゼロ空気間隙量曲線からずれてくるということと、団粒構造が破壊されてくるということとの関係を直接求めたわけではないけれども、きっとそのようになるであろうと考えている段階である。53, 56, 58年の関係の中で、石膏は全然処理をしていない状況の比較である。

久保田（中国農試） 土壌の反応、つまり pH がどのように推移するかということは、色々な点で重要である。例えば、pH が高い段階では、膨潤、収縮しやすいし、下がれば凝集系に粘土はなるという問題がある。そ

してもう1つは、ある pH 以下に下がると、干拓地のような、還元土壌は酸化されて、酸化鉄の被膜が構造の面に出てくるという現象がある。そのようなことから、なるべく pH をあげないで、ナトリウム形をカルシウム形に置き換える為に、石膏が、適切である。pH を下げる方向でなおかつ、カルシウムを供給できる。干拓地に石膏が良いということは、Russel 等の本に書いてあるが、その点の配慮をどう考えているのか。また、石膏を入れた場合、実際に pH がどの位まで下がるのか。

三野（岡山大） 笠岡は、今までの干拓土壌からみて、特異な干拓土壌で、pH が下がらない。つまり、酸性にならない。その点が、児島の粘土とまったく違う特異な点である。それは、カルシウムがかなり土の中にあるということも考えられる。このことについては米田先生の御指摘をうけ、色々ディスカッションしながら研究を進めている。今までの干拓地土壌とは違うので、笠岡の特異な点を考慮して pH をおろそかにしている訳ではないが、別な面からも考えてみようという形で着手している。今後、色々御教授をうけ、pH の点にも、配慮してゆく。