

土壤水分から見た酸性硫酸塩土壤生成過程とその改良方策

足立 忠司*

Process of Acid Sulfate Soil Formation from the Viewpoint of Moisture
Conditions on Coastal Muddy Soil and a trial of it's Amelioration

Tadashi ADACHI *

(Received January 16 , 1996)

According to recent soil survey data, it has been reported that acid sulfate soils cover areas of about 11,670,000 hectares all over the world and about 40 % of those are in South-East Asia. Most of crops could not be grown on those areas without any amelioration due to low soil pH.

This report consists of two parts. One is on acid sulfate soil formation in laboratory experiment. Another is on a trial of acid sulfate soil amelioration in field experiment.

The results obtained on acid sulfate soil formation, in order to make clear the relationships between the process of oxidation of sulfur compounds and the moisture conditions (moisture suction) in coastal muddy soils, in laboratory experiment are summarized as follows;

The concentration of sulfuric ions increase as oxidation of sulfur compounds contained in pyrite, etc. occurs, and as a consequence, the soil pH decreases in the coastal muddy soil (Fig.1). Especially, the soil pH decreased remarkably in the range of pF 2.3~3.4.

The activity of soil microorganism takes part in this reaction by helping out with bringing about sulfur oxidation and formation of sulfuric ions.

The pH decrease in the soil with autoclaved treatment was only slight at pF values lower than pF 3.0. Accordingly, it is concluded that the decrease of pH in coastal muddy soil occurred mainly due to soil microorganisms which oxidize sulfur compounds under the condition of higher-water than pF 3.0.

The results of field experiment is summarized as follows;
As a general rule, it is able to remedy the surface acidification of peat/acid sulfate soils by mixing lime dust with plough layer. However, the effect of mixed lime dust is easily disappeared in the area where the acidic ground water table is always high and moves up over the surface in rainy season.

Therefore, it was carried out that several experiments for seeking protection against surface acidification due to capillary upward movement of acidic ground water by means of inserting a buffering layer of lime gravel (thickness of lime gravel layer = 5cm) between the top soil and the acidic subsoil (20 cm depth)

* 岡山大学環境理工学部 (Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University)

in the fields, Munoh series which is young acid sulfate soil, at the Narathiwat Land Development Center in South Thailand. The results of soil pH measurement carried out in the field in November of 1985, August of 1987 and September of 1990, it coincides with 2, 4 and 7 years respectively after the beginning of the experiments, are shown in Table 3. In the plot of P2 and U1, application of lime dust to the plough layer can increase soil pH rapidly but it's residual effect is not so long. Within a 5 year period, the soil pH is likely to return to below 4. On the other hand, an underlaid lime gravel layer tends to improve the soil around the lime gravel only slight but steadily with time. Therefore, it is concluded that surface soil acidification caused by the upward movement of acidified ground water would be protected against, rapidly and continuously, by both mixing lime dust with plough layer and underlying lime gravel below plough layer. If acid sulfate soil areas would be used as upland fields, much of organic matters in soil are easily decomposed by drying.

Therefore, it is suggested that it would be better for these areas to be used as paddy fields, also from the above results.

Key words: Acid sulfate soil, Soil microorganisms, Moisture conditions, Amelioration, pH, Sustainable effect

I. 緒言

本報告では、酸性硫酸塩土壌とは、乾燥の進行に伴って、土壌中の硫化物の酸化により引き起こされる強酸性の土壌の総称として用いている。沿岸浅海域に堆積した土壌は、乾燥を受ける条件下におかれると、酸性硫酸塩土壌となり、強酸性土壌に変質する可能性を有する。代表的なものとして、東南アジアの沿岸地帯に広く分布するマングローブ林地が挙げられる。このマングローブ林地が自然にあるいは人為的に陸化されると酸性硫酸塩土壌となる¹⁾。我国においても、干拓地とか丘陵地の海成由来の土壌が乾燥条件下におかれると酸性硫酸塩土壌となる例がみられる²⁾。この原因は、還元条件下の泥土中に生成していた硫黄化合物、主としてパイライト (FeS_2) がその干陸後の熟成過程において酸化されて硫酸が生成されるためである³⁾。この酸化過程には干陸当初に含まれる塩分や微生物の活性等の要因が深く関わっている。

本報告の目的は、海成由来の土壌を対象にその乾燥に伴う酸性硫酸塩土壌生成過程と土壌水分の状態量との関係を実験的に解明することにある。さらに、酸性硫酸塩土壌の改良方策（農地利用）の一例としてタイ国南部において試みた改良方策の持続性について検討することにある。

II. 土壌水分から見た酸性硫酸塩土壌生成過程

1. 供試土ならびにその調整

沿岸低湿地土壌として、汽水条件下で生成され、乾燥履歴を受けていない湖底堆積土を採土し、供試した。採取時点の供試土は、pH 7.22、EC 4.18mS/cm、有機物含有量 4.3 %であり、また、簡易測定法による⁴⁾ 本供試土のパイライト含有量は乾土当たり 0.9 %であった。これらの値が以下の実験に供する際の土壌の初期条件となる。この供試土を薄くバット上に広げて自然含水比から風乾状態まで均一に乾燥させた。この際、あらかじめ水分段階を12段階に定めておき、その所定の水分状態に達

したらビニール袋に密封・静置し保存した。その後、12段階の試料がすべてそろった時点乾燥直後とし、まず、保存期間が乾燥直後としてのpH、ECを測定し、その懸濁液は濾過して化学成分も調べた。残土は水分が変化しないように再び密封保存しておき、酸性発現の時間的効果を見るために、所定の保存期間（2週間後、1ヶ月後、2ヶ月後、3ヶ月後）における各段階の水分状態にある土壤のpH、ECを測定した。さらに、同時に各試料のコンシステンシーも測定した。なお、乾燥指標としての試料の水分表示は、含水比表示のほか、乾燥に伴うpF～含水比関係を別途求め⁵⁾、含水比をpFに換算した。

2. 結果と考察

1). 土壤pHの変化と土壤水分状態

Fig.-1に、同一水分保存期間をパラメーターにとり、土壤水分とpHの関係を示している。土壤水分は他の土壤と比較し得るために、すなわち土壤の質的な水分状態量pFとpHの関係を検討するために、pFで表示している。これによると、いずれの保存期間とも、pFとpHの関係は、下に凸の曲線となっている。また、初期乾燥段階では、最もpHが低下する水分状態は、pF2.3～3.4であり、pH5以下となっている。さらに、水分変化を生じさせないように密封静置した試料では、経時につれ全水分段階においてpHが低下しながらも、pHの低下が見られるpF値は2.3～3.4で認められ、3ヶ月後の試料では、この水分領域で、pH3強まで低下している。

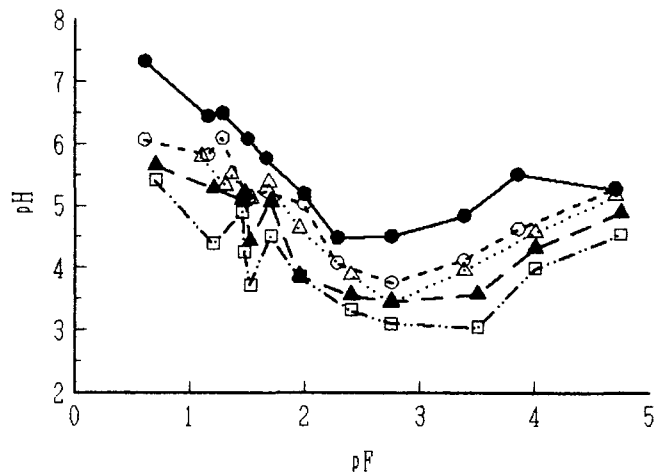


Fig.-1 Relationship between pH and pF

(●; just after drying, ○; 2 weeks, △; 1 month, ▲; 2 months, □; 3 months)

この現象は、土壤水分状態によって、pHの低下速度が大きく異なることを意味しており、最もpHの低下が進行する水分状態、言い換えると初期酸化が著しい水分状態はpF3前後であることを示している。干拓地土壤を対象とした既報⁶⁾に

よると、このpHの低下する原因は、パイライトの酸化に伴う硫酸イオンの増大として観察される。また、pH低下に及ぼす初期ECの影響も大きく、初期乾燥段階ではECの低い試料ほど、また高pF段階（低水分状態）ほどpHの低下速度が大きい、経時につれ初期ECのpHに及ぼす影響は小さくなる。

2). 微生物的酸化と土壤水分

酸性硫酸塩土壤生成過程には、化学的酸化と微生物的酸化が共に関与し、微生物（鉄バクテリア、*Thiobacillus ferrooxidans*）の働きが極めて大きいことが報告されているが、微生物的酸化と土壤水分との関係は明確にされていない。

Fig.-1において、特にpHの著しい低下が生じる水分状態が存在することが分かったが、この現象は、化学的酸化と微生物的酸化の折り合う領域と考えた。すなわち、水分が豊富な土壤水分領域では微生物の活性は高く微生物的酸化が卓越するが、風乾のように高pF領域では、微生物の活性が弱く化学的酸化が卓越すると考え、pHが最も低下するpF域は微生物的酸化と化学的酸化が折り合う点と考えた。

そこで、この微生物の働きを確かめる一方法として、オートクレーブで微生物の活性を除いた試料の酸性硫酸塩土壤生成過程を検討した。すなわち、120℃のオートクレーブで15分間処理することで、

微生物の影響が無視できると考えた。

Fig.-2にオートクレーブで処理しなかった土壌とオートクレーブで熱処理した土壌のpFとpHの関係を示している(ただし、処理後1ヶ月静置・保存した試料である)。これによると、熱処理、無処理いずれの土壌水分状態pFと土壌pHとの定性的傾向は同じと見ることが出来るが、両者の定量的相違はpF3以下の高水分領域に認められる。すなわち、pF3以下の高水分域では、オートクレーブで熱処理した土壌の乾燥に伴う試料のpHと熱処理を施さなかった試料のpHには1.5もの差が認められた。この現象は、pF3より低pF領域(高含水比領域)において、微生物の働き、微生物的酸化が関与していることを意味している。また、このことは、沿岸低湿地土壌の初期的酸化発現は微生物の働きによるものが主であると言える。

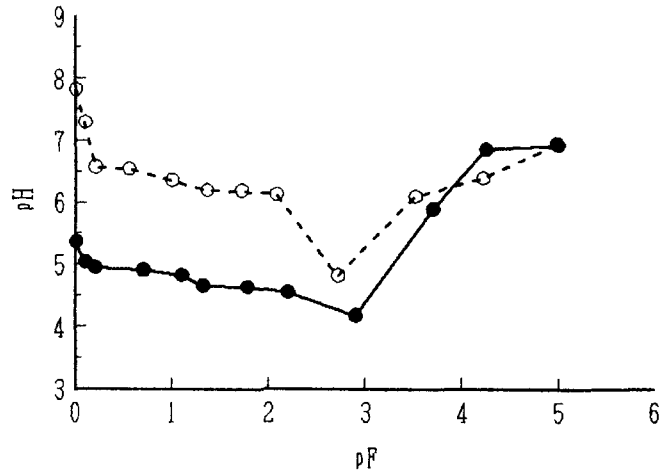


Fig.-2 Influence of microorganisms on sulfur oxidation (○;heat-treatment, ●;non-treatment)

3)酸性硫酸塩土壌生成過程とイオン挙動

土壌中に有害重金属が存在していても、それが不溶性であれば、植物による吸収量が少なく、障害が現れ難い。しかし、酸性硫酸塩土壌生成過程において、酸性化が進行すると、各種イオンの溶解度が変化することが考えられる。そこで、濾過液中のイオンならびに重金属挙動を検討したが、ここでは、酸性の本体をなし普通の植物には有害物質として働くアルミニウムイオンならびに重金属汚染の指標ともなりうる亜鉛の挙動を例として検討する。

Fig.-3にpHとアルミニウムイオンの関係を示している。これによると、pH5まではアルミニウムイオンの溶脱は認められないが、それ以上酸性化が進行すると、水溶液中にアルミニウムイオンの存在が確認される。とくに、pH4以下では、急激に増加している。さらに、保存期間が長くなるほど溶脱するアルミニウムイオン量は増大し、かつ同一pHに対する溶解度も大となる傾向を示している。

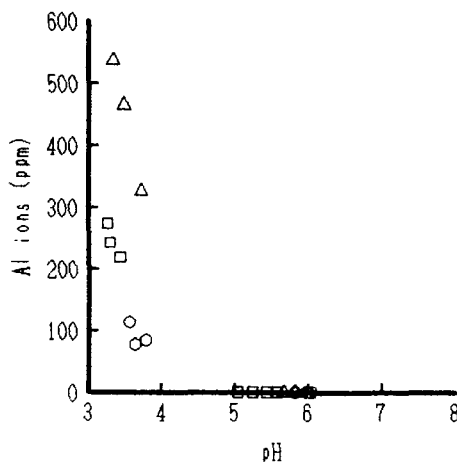


Fig.-3 Relationship between concentration of Aluminum ions and pH (○;2 weeks, □;4 weeks, △;8 weeks)

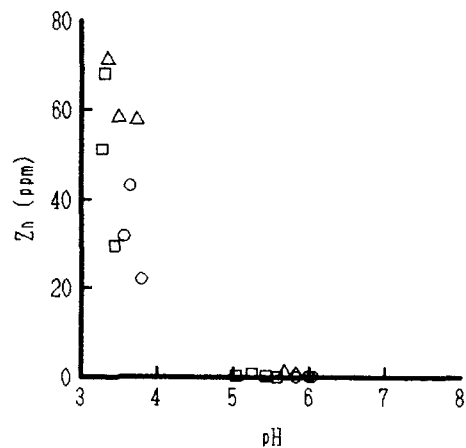


Fig.-4 Relationship between concentration of Zinc and pH (○;2 weeks, □;4 weeks, △;8 weeks)

Fig.-4にはpHと亜鉛の溶脱量との関係を示している。これによると、アルミニウムイオン挙動と同じく、pH5までは亜鉛の溶脱は認められないが、それ以上酸性化が進行すると、水溶液中に亜鉛の存在が確認され、pH4以下では、急激に増加している。しかし亜鉛の場合には、保存期間の長短による亜鉛溶脱量の有為な差は認められない。

4)酸性硫酸塩土壤生成過程とコンシステンシー

本供試土は湖底堆積土である。湖底堆積土を資源として再利用することを念頭におくと、その力学的な変化も重要な検討課題となる。その観点から、本供試土のコンシステンシーの測定を行い、結果をFig.-5に示している（ただし、保存期間が2ヶ月後の試料のみ）。

これによると、乾燥するにつれ（pFの増大）、液性限界（LL）の値は低下するが、塑性限界（PL）、収縮限界（SL）の各値はほとんど変化していない。一般には、土壤は乾燥に伴いその含有水分が非可逆的に脱水され、コンシステンシーの各値は低下するが、Fig.-5の結果にはこの乾燥の影響が強く現れ、2ヶ月程度の保存期間では、溶解されるイオンの相違による影響は検討できなかった。

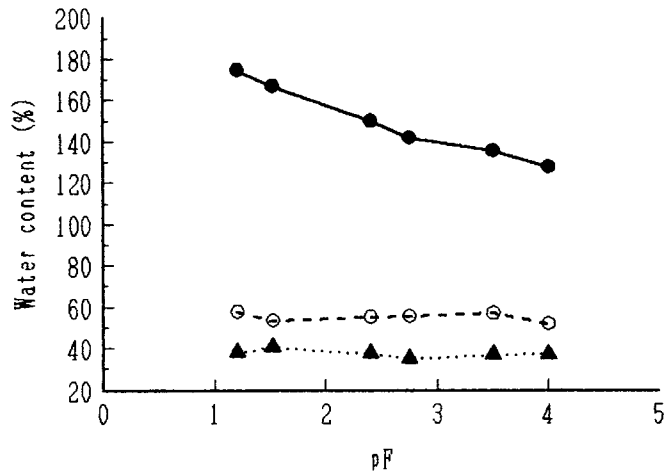


Fig.-5 Relationship between LL, PL, SL and pF
(Samples of 2 months after drying) (●:LL, ○:PL, ▲:SL)

3. まとめ

乾燥履歴を受けていない土層が乾燥条件下におかれると、その土層構造は、壁状→柱状→角塊→亜角塊→くず粒構造へ

と層分化の発達が見られる。この物理的層分化には乾燥亀裂が重要な働きをするが、一次亀裂の発達はpF 1.7~2.0、二次亀裂のそれはpF 2.5~2.7の水分状態で生ずる⁶⁾。したがって、上記の初期的酸化発現のpF値とこの土層の分化過程を併せ判断すると、沿岸低湿地土壤の乾燥が進むと乾燥亀裂が発生・発達、すなわち土壤構造の発達により塩分の洗脱がおき、さらに土層の乾燥が進行し、角塊状構造（二次亀裂の発生により生ずる）から亜角塊状構造へと構造発達がみられると、微生物の働きが活発になる最適な水分環境が形成され、土壤の酸化が急激に進み、土壤は酸性化すると考えられる。土壤の酸性化が進行すると、各種イオンの溶解度が変化し、作物にとって有害物質となりうるアルミニウムイオンや重金属の溶出が見られることになる。それ以前に、酸性化の原因は硫酸の生成によるものであるから、酸性硫酸塩土壤生成過程において、雨水等による硫酸イオンの洗い出しによる周辺環境悪化の危惧も考えられる。その危惧を無くするためには、潜在的に酸性硫酸塩土壤となる可能性を有する土壤の改良方策を検討しておく必要がある。

III. 酸性硫酸塩土壤の改良方策の試み

東南アジアには、海水あるいは汽水下で生成された酸性硫酸塩土壤が広く分布している。これらの地帯は潜在的農地とされているが、強酸性であるために不良土として放置されていることが多い。

酸性土壤を農地利用する場合のその改良には、作土層に石灰粉末を混入する方法が広く用いられるが、常に土壤を酸性化させる物質が供給されるような条件下、あるいは地下水が酸性でかつ高いような条件下では、単に石灰粉末を混入する方法のみでは効果の持続性は期待できない。タイ国南部の酸

性硫酸塩土地帯は、まさにこの状況にあり、雨期の後半には湛水し、pH 3前後の強酸性水の地下水と連結し、結果として土壤悪化につながっている。

そこで、タイ国南部の酸性硫酸塩土壤において（その土層断面をTable-1に示す。20cm以深にジャロサイトの存在が確認された⁷⁾）、①作土層に石灰粉末を混入することにより、酸性矯正効果の速効性を期待すると共に、②作土層下に石灰レキ層を敷設することにより、強酸性の地下水の上昇に際して、そのpHを改良して土壤がより酸性化することを防ぎ、かつ石灰レキ施用効果の持続性を期待し、③石灰レキ層を通過し中和された水の作物への利用を図ること、を目的に試験圃場を造成し酸性矯正効果を検討した。最大直径 3/8インチの石灰レキを主体に石灰レキ層は 5cmとし、水田、畑を造成した。各造成圃場の名称と施用は Table-2の通りである。なお、pH 2.75の強酸性水を石灰レキと 100分間程度接触させるとそのpHが6.5に上昇することを確認した後で実施した⁸⁾。

Table 1 Soil profile for experimental field

Depth cm	Colour	Texture	pH	T-C %
7	10YR3/2	muck	2.86	35.01
	7.5YR3/2	mucky loam	3.03	25.94
11	7.5YR3/2	mucky loam	3.04	25.93
	7.5YR4/2	light clay	2.84	7.50
35	7.5YR3/1	clay	2.51	6.80
	5Y5/1	clay	2.97	6.96
85	5Y5/1	clay	3.77	1.68

1. 結果と考察

造成圃場では、水田には数種の水稲、畑にはトウモロコシの栽培がなされ、これらの収量においても石灰レキ敷設層の効果が認められた。また、石灰レキ層による土壤水分環境の変化も検討したが、ここでは土壤pHについて、土層改良の持続的効果という観点からのみ検討する。

試験圃場は、1983年 8月に造成されたが、造成後 2,4,7年経過した土層のpH値をTable-3に示している。

これによると、石灰粉末を混入したのみのP2、U2圃場の表層は1985年にはpHの上昇が認められるが、時間の経過と共にpHが低下しており、石灰粉末のみでは持続性が乏しいことが分かる。また、石灰レキ層のみでは（P3、U2）、若干のpH上昇がうかがえるも、石灰レキ層直上下のみが改良されているに過ぎない。石灰レキ層を敷設し、その上層を石灰粉末混入により改良すると（P4、U3、U4）、改良直後からpHは上昇する。すなわち、速効性ならびに持続性両面からpHの改良が期待できる。

2. まとめ

酸性硫酸塩土壤の農地工学的改良の一方策として、作土層下に敷設した石灰レキ層の酸性矯正能ならびにその持続性という観点から検討した。その結果、石灰レキ層により作土層が経時につれ次第に改良される可能性が見いだされ、低pHにある地下水位の雨期の上昇に伴う作土層の酸性化を防ぐことができ、かつ土層の改良も進行することになる。しかしながら、地表面下20cm以深にジャロサイトが存在するために、20cm深に石灰レキ層を敷設したが、表土はぎを行って石灰レキ層を敷設する労働力、また石灰の購入経費とその運搬費を考慮しなければならない。また、一般には酸性硫酸塩土地帯は低湿地であるため、農地利用のためには排水を強化しなければならないが、排水を強化すると、地盤沈下（有機物の分解促進による分も含めて）が大きな問題となる。石灰レキ層敷設による方策は、この点も念頭におき排水強化を図らず、下層からの低pHの水を中和し利用する試みであったが、有機物含有量の高い作土層の減少（有機物の分解）が激しく、客土の必要性が出ている。

Table 2 Treatment of each experimental plot

Land Use	Plot Name	Treatment
Paddy Field	P1	No treatment (Control)
	P2	Lime dust
	P3	Underlaid lime gravel
	P4	Lime dust and underlaid lime gravel
Upland Field	U1	Lime dust
	U2	Underlaid lime gravel
	U3	Lime dust and underlaid lime gravel
	U4	Lime dust and underlaid big and fine lime gravel

なお、本項改良方策の検討は、筆者の担当部分（未公表）ではあるが、1983年からの科研・国際学術調査（代表者；東京農業大学高井康雄教授）の補助のもとに実施されたものであり、代表者ならびに共同研究者の成果でもあることを付記する。

Table 3 pH changes in each experimental plot
(Munoh series, at Narathiwat LDD Center, South-Thailand)

Plot Paddy	Depth (cm)	pH			Plot Upland	Depth (cm)	pH			
		'85.11	'87. 8	'90. 9			'85.11	'87. 8	'90. 9	
P1-1	0 - 2	3.80	3.15	3.28	U1-1	0 - 2.5	6.67	4.80	3.60	
	2 2.5- 7.5	3.93	3.17	3.22		2 2.5- 7.5	6.58	3.50	3.37	
	3 7.5-12.5	3.76	3.18	3.18		3 7.5-12.5	4.60	3.17	3.20	
	4 12.5-17.5	3.68	3.12	3.20		4 12.5-17.5	3.94	3.02	3.10	
	5 17.5-22.5	3.53	3.10	3.15		5 17.5-22.5	3.61	2.97	3.12	
	6 22.5-27.5	3.39	3.00	3.12		6 22.5-27.5	3.53	2.90	2.95	
	7 27.5-32.5	3.38	2.80	3.10		U2-1	0 - 2.5	3.74	3.43	
	8 32.5-37.5	3.28		3.00			2 2.5- 7.5	3.62	3.40	
P2-1	0 - 2	5.28	3.70	3.50	U2-1	3 7.5-12.5	3.68	3.50		
	2 2.5- 7.5	5.77	3.45	3.36		4 12.5-17.5	3.83	3.82	5.38	
	3 7.5-12.5	5.66	3.22	3.30		5 20	5.14	5.57		
	4 12.5-17.5	4.56	3.13	3.18		6 LG				
	5 17.5-22.5	4.01	3.02	3.12		7 25	5.00	3.50	3.32	
	6 22.5-27.5	3.81	3.12			8 27.5-32.5	3.89	3.02	3.05	
	7 27.5-32.5	3.68	3.00			U3-1	0 - 2.5	6.47		
	8 32.5-37.5	3.44					2 2.5- 7.5	6.21	5.40	
P3-1	0 - 4	4.42	3.98		3 7.5-12.5		6.05	5.23		
	2 4 - 10	4.35	4.00	4.60	4 12.5-17.5		4.94	5.35	5.68	
	3 12	6.30	4.20	4.53	5 20		5.47	5.20	5.90	
	4 LG				6 LG					
	5 17	6.06	3.40	3.38	7 25		5.50	3.95	3.30	
	6 19.5-24.5	3.47	3.20	3.10	8 27.5-32.5		3.77	3.40	3.28	
	7 24.5-29.5	3.40			U4-1	0 - 2.5	6.80			
P4-1	0 - 4	5.73	5.35			2 2.5- 7.5	5.55	5.15		
	2 4 - 10	5.64	5.58			3 7.5-12.5	4.79	5.01		
	3 12	6.16	5.45	5.00		4 12.5-17.5	4.46	4.90	6.00	
	4 LG					5 20	5.39	4.50	5.86	
	5 17	6.68	4.23	3.52		6 LG				
	6 19.5-24.5	3.78	3.65	3.30		7 25	6.27	3.60	3.30	
	7 24.5-29.5	3.64				8 27.5-32.5	3.80	3.05	3.10	

Remarks) ① Flooding at '85.11.
② pH of surface soil (1983.8); pH 2.51~3.04
③ pH of ground water (1983.8); pH 3.36

引用文献

- 1) 久馬一剛：熱帯低湿地開発の諸問題、土壌の物理性第63号、pp.43~50 (1991)
- 2) 足立忠司他4名：干拓地土層の農地化過程—中海干拓楨屋・安来地区の事例—、農士会誌 56(12)、pp.45~51 (1988)
- 3) 久馬一剛：酸性土壌とその利用（田中明編）、「第4章熱帯、特に東南アジアにおける低湿地土壌の分布と特性」、pp.101~142、日本土壌肥料学会監修、博友社（1984）
- 4) 村上英行：過酸化水素による干拓地土壌中の可酸化性イオウの半定量法、日本土肥誌 32(6)、pp.276~279 (1961)
- 5) 足立忠司・竹中隆：ヒズミ速度効果ならびに土壤水分からみた粘性土の工学的性質、農士論集、43、pp.26~32 (1973)
- 6) 足立忠司・松本康夫・原徹夫：土壤水分から見た干拓地土壌の酸性硫酸塩土壌化過程、農士論集、162号、pp.89~96 (1992)
- 7) S.Matsumoto and P.Vicharnsorn: Soil survey and chemistry, INTERIM REPORT OF COMPARATIVE ECOLOGICAL STUDIES ON SALINE SOILS IN COASTAL AND INLAND REGIONS OF THAILAND, pp.34~46, COOPERATIVE RESEARCH BETWEEN NRCT AND JSPS (1984)
- 8) 足立忠司他4名：タイ国南部に分布する酸性硫酸塩土壌の改良、農士会誌 56(2)、pp.5~10 (1988)