

干拓地水田の作土層および耕盤層 における粗間隙の形成について

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻
地域保全工学講座 流域保全学教育研究分野
510M204 古谷 啓

課題

「干拓地水田の作土層および耕盤層における粗間隙の形成について」

Keyword:干拓地水田土壌、亀裂、管状孔隙、斑鉄形成、間隙の接続性、間隙の形状保存、地下水位、軟 X 線影像法・画像法、室内実験、実験マニュアル

目次

1. はじめに	1
1.1 干拓地の水田構造について	1
1.2 転換畑の土層構造について	2
1.3 土壌粗間隙について	4
1.4 限界負圧	6
1.5 斑鉄について	9
2. 研究目的	12
3. 研究方法	
3.1 調査地	13
3.2 室内実験	17
3.2.1 基本的土壌物理性	17
3.3.2 透水試験	27
3.3.3 限界負圧試験	29
3.3.4 土壌水分特性試験	31
3.3.5 軟 X 線影像	34
3.3.6 軟 X 線画像法による「面密度」測定	38
4. 結果	
4.1 調査現場	45
4.2 室内実験	
4.2.1 基本的物理性	50
4.2.2 透水性	62
4.2.3 限界負圧	64
4.2.4 土壌水分特性	70
4.2.5 軟 X 線影像	83
4.2.6 面密度	94
4.2.6 表土水平面デジタル画像	105

5.考察	
5.1 作土層および耕盤層の構造	108
5.2 デジタル画像による亀裂の幾何学的特性	111
5.3 管状孔隙の形状	112
5.4 各土層の亀裂および管状孔隙の接続性	116
5.5 地下水位変動による粗間隙の影響	118
5.6 総合考察	120
6.おわりに	121
謝辞	122
引用・参考文献	123
附録	
・面密度 3D グラフ	
・要旨	

図表一覧

- Fig. 1-1 畑, 水田の模式的な土層構造
- Fig. 1-2 土壌間隙の分類(原図：成岡)
- Fig. 1-3 完全開放間隙が1組発生する過程のモデル図(古谷加筆)
- Fig. 1-4 P_k -脱水曲線における水平性の分類(原図：成岡, 古谷加筆)
- Fig. 1-5 PK-脱水曲線における緩急性, たわみ性の分類(原図：成岡, 古谷加筆)
- Fig. 1-6 熊田論文における鉄集積に関する模式図
- Fig. 1-7 木村らの論文における鉄集積に関する模式図
- Fig. 1-8 木村らの論文におけるリーゼガング現象
- Fig. 3-1 熊本平野水平方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画)
- Fig. 3-2 熊本平野鉛直方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画)
- Fig. 3-3 熊本調査地広域図(引用：Google Map)
- Fig. 3-4 熊本調査地中域図(引用：Google Map)
- Fig. 3-5 熊本調査地詳細図(引用：Google Map)
- Fig. 3-6 三角座標による土性区分(国際土壌学会法)
- Fig. 3-7 塑性図と力学的性質
- Fig. 3-8 定水位透水試験装置図(原図：増井)
- Fig. 3-9 P_k -脱水曲線の模式図
- Fig. 3-10 装置概要図
- Fig. 3-11 スキャナーによる画像取り込み方法(原図：廣住)
- Fig. 3-12 画像解析の手順
- Fig. 3-13 面密度 3D グラフ例図
- Fig. 4-1 土壌断面調査
- Fig. 4-2 土壌断面硬度分布(山中式硬度計)
- Fig. 4-3 三相分布図(熊本 I 層)
- Fig. 4-4 三相分布図(熊本 II 層)
- Fig. 4-5 三相分布図(熊本 III 層)
- Fig. 4-6 三相分布図(熊本 IV 層)
- Fig. 4-7 三相分布図(熊本 V 層)
- Fig. 4-8 粒度分布曲線(熊本 I 層)
- Fig. 4-9 粒度分布曲線(熊本 II 層)
- Fig. 4-10 粒度分布曲線(熊本 III 層)
- Fig. 4-11 粒度分布曲線(熊本 IV 層)
- Fig. 4-12 粒度分布曲線(熊本 V 層)
- Fig. 4-13 土性(熊本 I 層)
- Fig. 4-14 土性(熊本 II 層)

- Fig. 4-15 土性(熊本Ⅲ層)
- Fig. 4-16 土性(熊本Ⅳ層)
- Fig. 4-17 土性(熊本Ⅴ層)
- Fig. 4-18 塑性図(熊本Ⅰ層)
- Fig. 4-19 塑性図(熊本Ⅱ層)
- Fig. 4-20 塑性図(熊本Ⅲ層)
- Fig. 4-21 塑性図(熊本Ⅳ層)
- Fig. 4-22 塑性図(熊本Ⅴ層)
- Fig. 4-23 透水係数の鉛直分布(定水位透水試験)
- Fig. 4-24 限界負圧(熊本Ⅰ層水平方向)
- Fig. 4-25 限界負圧(熊本Ⅰ層鉛直方向)
- Fig. 4-26 限界負圧(熊本Ⅱ層水平方向)
- Fig. 4-27 限界負圧(熊本Ⅱ層鉛直方向)
- Fig. 4-28 限界負圧(熊本Ⅲ層水平方向)
- Fig. 4-29 限界負圧(熊本Ⅲ層鉛直方向)
- Fig. 4-30 限界負圧(熊本Ⅳ層水平方向)
- Fig. 4-31 限界負圧(熊本Ⅳ層鉛直方向)
- Fig. 4-32 限界負圧(熊本Ⅴ層鉛直方向)
- Fig. 4-33 pF- θ 曲線(熊本Ⅰ層水平方向)
- Fig. 4-34 pF- θ 曲線(熊本Ⅰ層鉛直方向)
- Fig. 4-35 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層水平方向)
- Fig. 4-36 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層鉛直方向)
- Fig. 4-37 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層水平方向)
- Fig. 4-38 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層鉛直方向)
- Fig. 4-39 pF- θ 曲線(熊本Ⅳ層水平方向)
- Fig. 4-40 pF- θ 曲線(熊本Ⅳ層鉛直方向)
- Fig. 4-41 pF- θ 曲線(熊本Ⅴ層水平方向)
- Fig. 4-42 pF- θ 曲線(熊本Ⅴ層鉛直方向)
- Fig. 4-43 pF 水分分布曲線(熊本Ⅰ層水平方向)
- Fig. 4-44 pF 水分分布曲線(熊本Ⅰ層鉛直方向)
- Fig. 4-45 pF 水分分布曲線(熊本Ⅱ層水平方向)
- Fig. 4-46 pF 水分分布曲線(熊本Ⅱ層鉛直方向)
- Fig. 4-47 pF 水分分布曲線(熊本Ⅲ層水平方向)
- Fig. 4-48 pF 水分分布曲線(熊本Ⅲ層鉛直方向)
- Fig. 4-49 pF 水分分布曲線(熊本Ⅳ層水平方向)
- Fig. 4-50 pF 水分分布曲線(熊本Ⅳ層鉛直方向)
- Fig. 4-51 pF 水分分布曲線(熊本Ⅴ層水平方向)

- Fig. 4-52 pF 水分分布曲線(熊本V層鉛直方向)
- Fig. 4-53 面密度測定ポイント A
- Fig. 4-54 面密度測定ポイント B
- Fig. 4-55 A1 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-56 A2 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-57 A20 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-58 A25 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-59 A29 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-60 A9 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-61 A24 の面密度 3D グラフ
- Fig. 4-62 A2 の面密度 X 軸方向断面グラフ
- Fig. 4-63 A2 の面密度 Y 軸方向断面グラフ
- Fig. 4-64 A20 の面密度 X 軸方向断面グラフ
- Fig. 4-65 A20 の面密度 Y 軸方向断面グラフ
- Fig. 4-66 A25 の面密度 X 軸方向断面グラフ
- Fig. 4-67 A25 の面密度 Y 軸方向断面グラフ
- Fig. 5-1 各土層の間隙モデル
- Fig. 5-2 調査地の湛水による表層土壌の変化
- Fig. 5-3 I 層の大気侵入メカニズム
- Fig. 5-4 各土層の間隙構造と繋がり
- Fig. 5-5 下げ潮時の水分・ガス移動
- Fig. 5-6 上げ潮時の水分移動
-
- Table 3-1 採取試料
- Table 4-1 塑性・液性試験結果
- Table 4-2 基本的物理性結果
- Table 4-3 定水位透水試験結果
- Table 4-4 Pk-脱水曲線の分類
- Table 4-5 土壌水分特性試験結果
- Table 4-6 pF 水分分布曲線の特徴
- Table 4-7 軟 X 線画像での粗間隙特徴
- Table 4-8 亀裂に関する各数値
- Table 4-9 班鉄層の管状孔隙に関する各数値
- Table 5-1 各土層の基本的土壌物理性 1
- Table 5-2 各土層の基本的土壌物理性 2

- Photo 3-1 装置全体図
- Photo 3-2 pF 装置図
- Photo 3-3 コンテナ配置
- Photo 3-4 軟 X 線発生装置(DCTS7003;SOFTEX 社)
- Photo 3-5 自動現像機(HI-RHEIN;NIX 社)
- Photo 3-6 スタンド(デジタルカメラ撮影用)
- Photo 3-7 セルの幅測定
- Photo 3-8 セルの高さ測定
- Photo 3-9 土壌サンプル作成過程
- Photo 3-10 撮影表面成形
- Photo 3-11 NAOMI-NX 設置
- Photo 3-12 面密度試料設置
- Photo 4-1 土壌断面
- Photo 4-2 土壌断面作土層近景
- Photo 4-3 土壌断面耕盤層近景
- Photo 4-4 土壌断面心土層近景
- Photo 4-5 斑鉄層鉛直方向画像
- Photo 4-6 斑鉄層鉛直方向近景
- Photo 4-7 熊本 I 層水平方向の軟 X 線画像(K1 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-8 熊本 I 層水平方向の軟 X 線画像(K2 : 限界負圧)
- Photo 4-9 熊本 I 層鉛直方向の軟 X 線画像(K3 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-10 熊本 I 層鉛直方向の軟 X 線画像(K4 : 限界負圧)
- Photo 4-11 熊本 II 層水平方向の軟 X 線画像(K6 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-12 熊本 II 層水平方向の軟 X 線画像(K7 : 限界負圧)
- Photo 4-13 熊本 II 層鉛直方向の軟 X 線画像(K8 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-14 熊本 II 層鉛直方向の軟 X 線画像(K9 : 限界負圧)
- Photo 4-15 熊本 III 層水平方向の軟 X 線画像(K11 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-16 熊本 III 層水平方向の軟 X 線画像(K12 : 限界負圧)
- Photo 4-17 熊本 III 層鉛直方向の軟 X 線画像(K13 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-18 熊本 III 層鉛直方向の軟 X 線画像(K14 : 限界負圧)
- Photo 4-19 熊本 IV 層水平方向の軟 X 線画像(K16 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-20 熊本 IV 層水平方向の軟 X 線画像(K17 : 限界負圧)
- Photo 4-21 熊本 IV 層鉛直方向の軟 X 線画像(K18 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-22 熊本 IV 層鉛直方向の軟 X 線画像(K19 : 限界負圧)
- Photo 4-23 熊本 V 層水平方向の軟 X 線画像(K21 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-24 熊本 V 層鉛直方向の軟 X 線画像(K23 : 透水試験, 土壌水分特性試験)
- Photo 4-25 熊本 V 層鉛直方向の軟 X 線画像(K24 : 限界負圧)

- Photo 4-26 面密度測定用試料
Photo 4-27 面密度測定用試料軟 X 線画像
Photo 4-28 作土層表層の亀裂近景

1. はじめに

我が国は、戦後の食糧難を乗り越えるために干拓事業を多く行ってきた。その多くは水田となり、安定した食糧配給の支えとなった。

しかし、農業の形態が変化するに伴って、田畑輪換や転換畑など、水田単作圃場から農地の多様化へ進んでいる。また、バイオマスエネルギーや、生分解性プラスチック等、生産される農作物自体の利用方法の多様化も進んできている。その一方で、農家の高齢化や、耕作放棄などにより、耕地面積や、耕地利用率は減少している。そのため、バイオマス利用による循環型社会や、高効率化による農業生産高の向上には、低地や干拓地といった広く平坦な土地を利用した大区画農地が必要になる。そのため、大区画化による農地の高度利用を行い、安定した作物栽培を行うためには、農地の多様化に伴って変化する土壤構造の実態解明、土壤内での物質や大気の移動経路の把握は重要である。特に干拓地は、もとは海であった地域を陸地化した土地であり、低地とは異なった土壤環境となっている。

本論では、研究対象とした干拓地の基礎的な現象を把握するため、干拓地水田、転換畑の土壤構造、あるいは農地土壤での特徴的な構造などについて整理する。

1.1 干拓地の水田構造について

干拓地は、干拓計画地の干潟や湖沼を堤防で囲い、堤防内の水を排除し陸地化したものである。

土壤について琵琶湖干拓地の圃場の例では、成岡(1991)によると、干拓地の表面土性分布は、干拓地中央部、西部は重埴土、その周辺の北部から東部にかけてはシルト質埴土および軽埴土、さらにその外側に壤土質砂土および砂土が分布している。鉛直方向の土壤構造は、比較的浅い位置に、グライ化した緻密な耕盤があり、全体として心土が柔らかく、耕盤が浮いているような構造であると報告している。

また、八郎潟干拓地では、強粘土質土壤が 79.8%、粘質土壤が 1.7%の面積を占めている(農業土木学会, 1972)。

このように、土壤は湖底、海底の影響が高く、大抵の干拓地は粘質で透水性の悪い土壤となっている。

1.2 転換畑の土層構造について

転換畑は、以前まで水田として使われていた圃場を畑に作り替える方法である。転換畑の構造は畑と違い、耕盤層を有し、透水性が悪い。

成岡(1991)は、水田を畑転換した場合は粗孔隙構造が発達し、水田構造から畑構造へ向かう過渡的構造をなしていると考察している。また、土壌断面は作土・耕盤・心土の3層構造を形成し、耕盤から心土にかけて亀裂と管状孔隙がみられ、斑鉄の形成もみられる。また、水田から畑へ転換した時、土壌への大気疎通により土壌は好气的条件下になり、土層環境に変化が生じる。

そこで、成岡(1991)は Fig.1-1 のような水田、畑の土層状況を示し、土層構造の変化に関する粗孔隙構造の重要性を論じた。

【Fig. 1-1 畑，水田の模式的な土層構造】

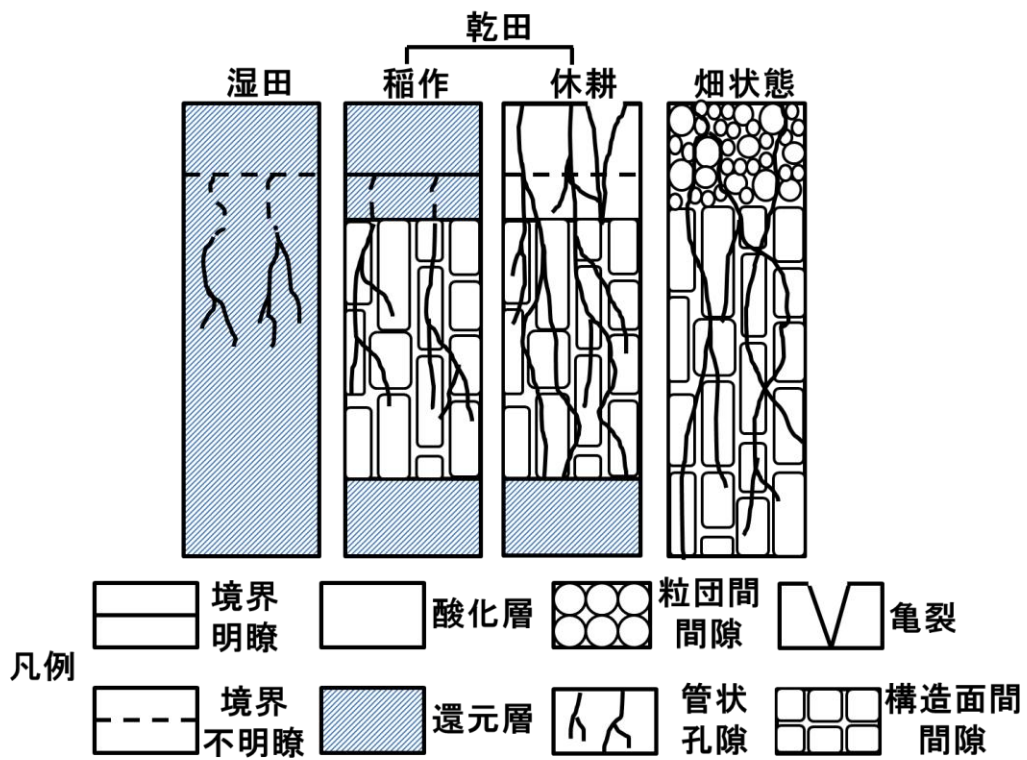


Fig. 1-1 畑，水田の模式的な土層構造(成岡原図，古谷加筆)

1.3 土壌粗間隙について

成岡(1991)は、土壌の間隙を Fig.1-2 のように分類した。

ここで、土壌粗間隙とは、図中の粗孔隙にあたる。粗孔隙はさらに、亀裂、管状孔隙に分類され、それぞれの特徴を以下に示す。

(1) 管状孔隙

管状孔隙とは、「円形断面、またはそれに近い断面をもった管状の連続的な孔隙」を指す(田淵, 1963 成岡, 1991)。主に小さい土壌生物の通行や、植物の根が腐朽した後にできる孔隙のことである。土層の水平・鉛直方向に伸直しており、土壌中の物質移動、通気、通水などの経路となり、土壌中の通気性、透水性に大きく影響している。

既存の研究として、たとえば、成岡(1991)は、それぞれ条件の異なる圃場から採集した不攪乱試料を軟 X 線撮影し、各層の間隙構造を視覚的に示し考察している。また、軟 X 線による土壌構造の映像化に関する概要も説明しており、軟 X 線影像法によるミクロな土壌構造の解析を可能にした。

(2) 亀裂

亀裂とは、土壌が乾燥、収縮することによりひび割れが発生し、それが大きくなり、土層の水平、鉛直方向に進展した曲面状の孔隙を指す。管状孔隙よりも大きな孔隙となるが、土層の鉛直分布で見ると、存在する密度は管状孔隙よりも少ない。

既存の研究として、井上(1988)は、亀裂が入った圃場内の水移動特性について考察している。

以上のように、管状孔隙、亀裂は、土壌内の物質移動に大きく影響する孔隙であることがわかる。

また、成岡(1991)は、「水で飽和した土壌から水を吸引し、最初に水が抜け出る間隙」を限界間隙とし、限界間隙には、土壌中を大気が貫通する「完全開放粗間隙」と、土壌内に大気侵入はあるが、貫通には至らない「不完全開放粗間隙」があることを Fig.1-3 のように示した。これは、試料土壌に負圧をかけ、1つの間隙が解放されるまでのプロセスを示す模式図である。図に示される記号)(は各負圧段階における間隙のメニスカスの位置を示しており、完全開放粗間隙の発生に至るまでの負圧を「限界負圧 P_k 」としている。

また、A グループは完全開放粗間隙、B グループは不完全開放粗間隙、C グループは完全開放粗間隙が、試料末端界面に到達するまでに、間隙内に大気侵入が始まらなかった間隙を示している。

【Fig. 1-2 土壌間隙の分類(成岡原図, 古谷加筆)】

【Fig. 1-3 完全開放間隙が 1 組発生する過程のモデル図(成岡原図, 古谷加筆)】

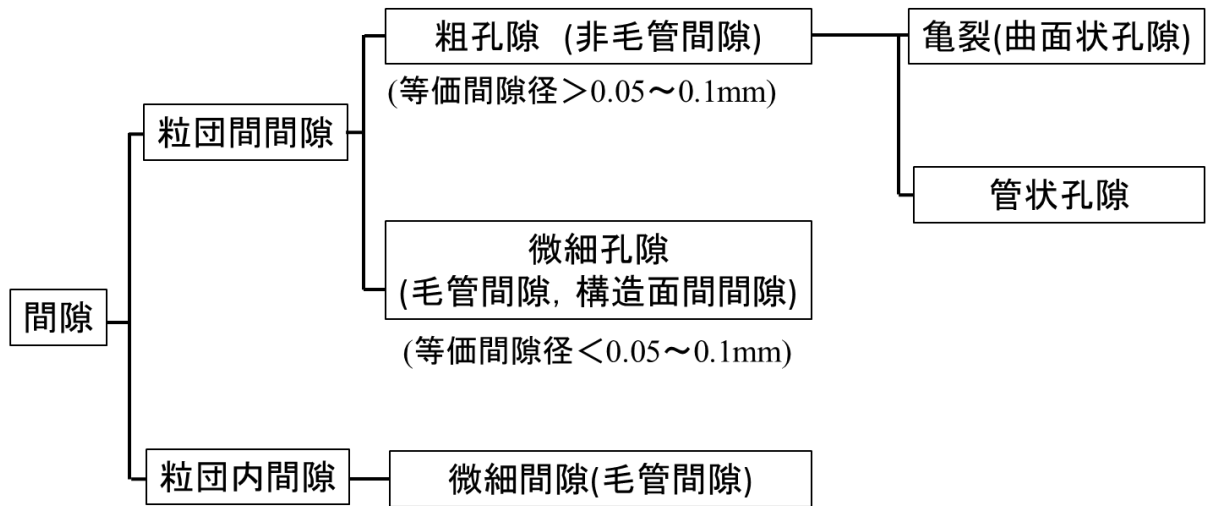


Fig. 1-2 土壤間隙の分類(成岡原図, 古谷加筆)

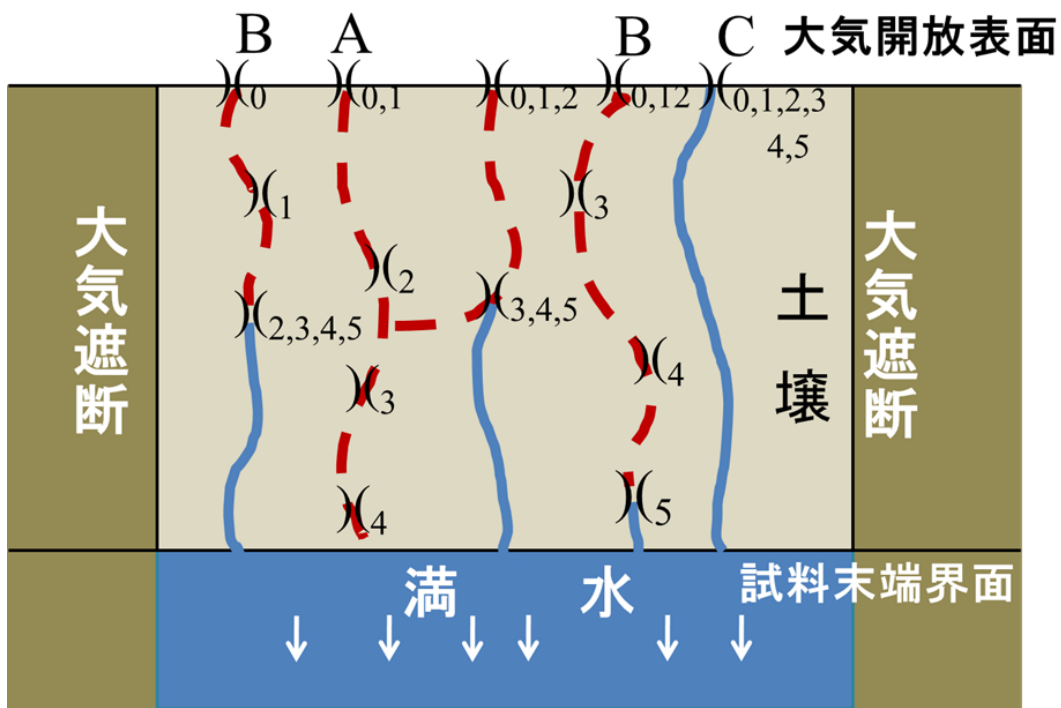


Fig.1-3 完全開放間隙が1組発生する過程のモデル図(成岡原図, 古谷加筆)

1.4 限界負圧について

成岡(1991)は、限界負圧試験で得られる P_K -脱水曲線の分類様式を Fig.1-3, Fig.1-4 のように示している。

Fig.1-3 の A は、完全開放粗間隙が発生する負圧 H_u に至るまでに水平部を有している。これは、 H_u より手前の負圧ですでに試料末端界面に到達しているが、開放先端のメニスカス張力が、負圧より大きいため解放されない状況である。

Fig.1-4 では、曲線勾配の緩急性で分類すると、a,b,c が急勾配、d,e,f が緩勾配となる。これは、各負荷圧段階での脱水量の多少を示しており、間隙径分布の相違を表している。つまり、急勾配は粗間隙に富み、緩勾配は微細な間隙が多い構造を示している。次に、曲線のたわみ性で分類すると、凸の曲線(a, d)、一様の勾配(b, e)、凹の曲線(c, f)に分類できる。これは、土壌間隙が限界負圧の範囲のどの段階で開放されるかを示している。つまり、凸の曲線では、初期の負荷段階に脱水量が多く、凹の曲線は、周期の負荷段階に脱水量が多いことを示し、一様の勾配の曲線は特殊な例となる。

このように、 P_K -脱水曲線を、水平性、曲線勾配の緩急性、曲線のタワミ性で分類し、間隙構造を分類することができる。

そして、これらの特徴か Fig. 1-6 のような開放間隙前線の後退モデルの模式図を示した。前線後退には円錐型、円筒型、ペンシル型がありそれぞれの特徴を以下に示す。

(1) 円錐型

Fig. 1-5 の a,b,c 群に相当するパターン。

開放間隙量は負荷圧の小さな変化に反応し、試料上部の開放量が多く、下部は少なく、全体として開放前線は円錐型で拡大していく。

(2) 円筒型

Fig. 1-5 の d,e,f 群に相当するパターン。

各々の間隙に存在する開放毛管膜のほとんどが同一の深さに後退し、開放前線は水平面上に並び、開放間隙量は円筒型で拡大していく。

(3) ペンシル型

前述の円錐型、円筒型の中間的性質を持つ土壌を対象としている。

【Fig. 1-4 P_K -脱水曲線における水平性の分類(成岡原図，古谷加筆)】

【Fig. 1-5 P_K -脱水曲線における緩急性，たわみ性の分類(成岡原図，古谷加筆)】

【Fig. 1-6 前線後退と開放間隙量の関係(成岡原図，古谷加筆)】

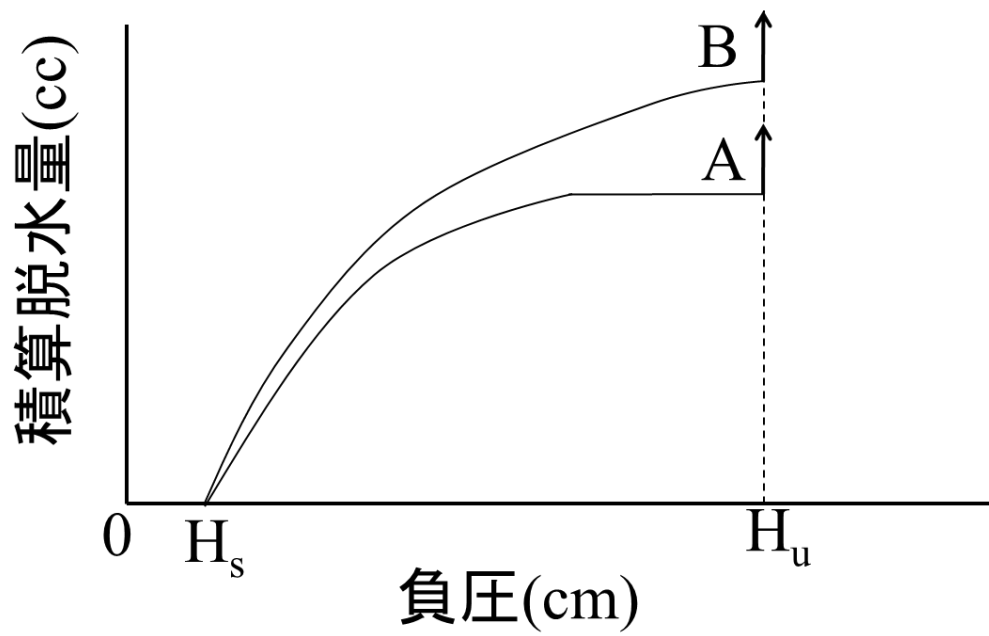


Fig. 1-4 P_K -脱水曲線における水平性の分類(成岡原図, 古谷加筆)

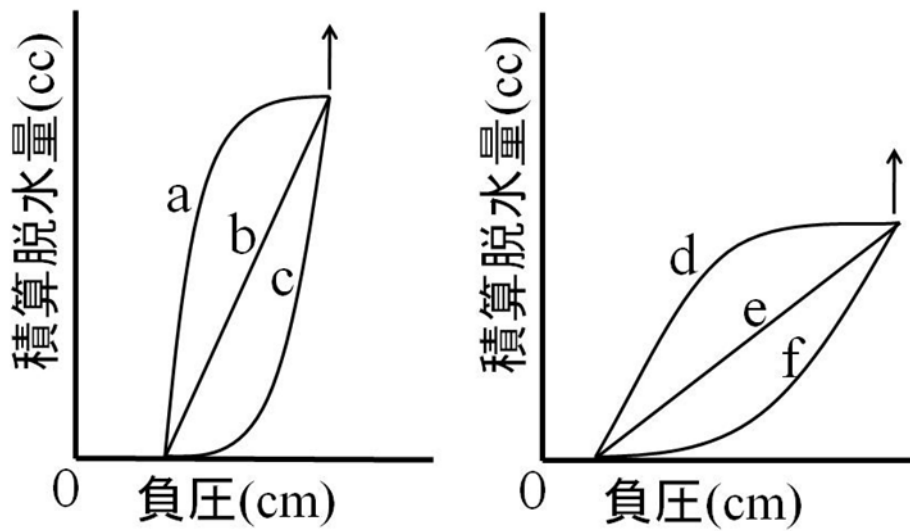


Fig. 1-5 P_K -脱水曲線における緩急性, たわみ性の分類(成岡原図, 古谷加筆)

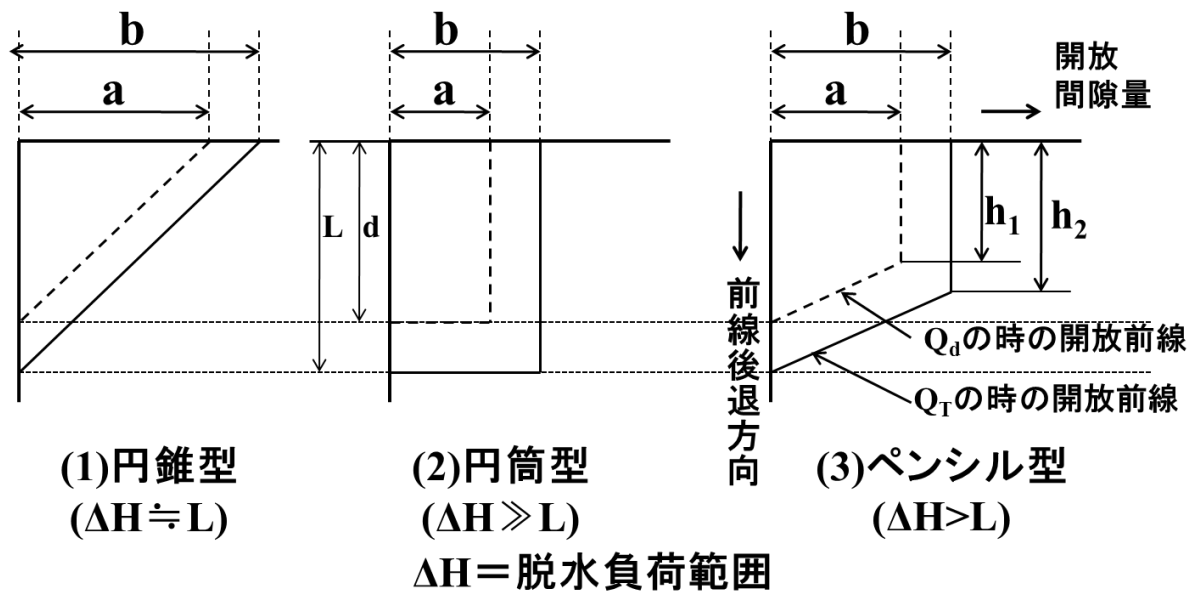


Fig. 1-6 前線後退と開放間隙量の関係(成岡原図, 古谷加筆)

1.5 斑鉄について

斑鉄とは、土層内に斑紋、または帯状に広がった橙色の層のことである。これは、酸化環境と還元環境を繰り返す水田に見られ、畑地土壌では見られない。

熊田(1949)は、斑鉄の集積位置と量、根の表面の酸化鉄による着色の程度等は土壌の遊離酸化鉄の含有量、還元程度、土性によって異なることを示した。

木村ら(1984)は、斑鉄の形成が、根から放出される酸素量、土壌の還元力の大小、根の還元力の大小によって決まるとしている。酸素放出量の多い冠根基部周辺では輪郭が不明瞭かつ広範囲の斑鉄が、酸素放出量の少ない二次根や、冠根先端部周辺では輪郭が明瞭で狭い範囲に斑鉄が各々形成されることを示した。また、還元状態の発達が比較的弱い土壌の二次根周辺ではリーゼガング現象が出ることを示した。

これら熊田、木村らの鉄集積に関する現象の模式図を Fig. 1-6～Fig. 1-8 に示す。

ここで、「リーゼガング現象」とは、須藤(1996)によると、ゼラチンやシリカゲル等に電解質を溶かした試料を作り、その試料の中の電解質と反応して沈殿を起こす別の電解質を加えて静置すると、環状やらせん状等様々な形状の沈殿を起こす現象である。このゼラチンやシリカゲルを粘土に変えても同様の反応を起こすことが確認されている。このような現象をリーゼガング現象という。

以上のことから、斑鉄は還元環境化で出来た水酸化鉄が、酸化環境となった時に酸化鉄となり、その場に沈殿した痕跡であることがわかる。この管状の斑鉄は、環状構造を保つ役割も持っており、土壌中の速やかな通気、通水の経路となることもわかっている(成岡, 1991)。

以上のように、土壌内の物質移動や、化学的、生物的反応など様々な土壌内で起こる現象を論じるには、土壌孔隙の構造、形成要因の把握はきわめて重要となる。

【Fig. 1-7 熊田論文における鉄集積に関する模式図(古谷)】

【Fig. 1-8 木村らの論文における鉄集積に関する模式図(古谷)】

【Fig. 1-9 木村らの論文におけるリーゼガング現象の模式図(古谷)】

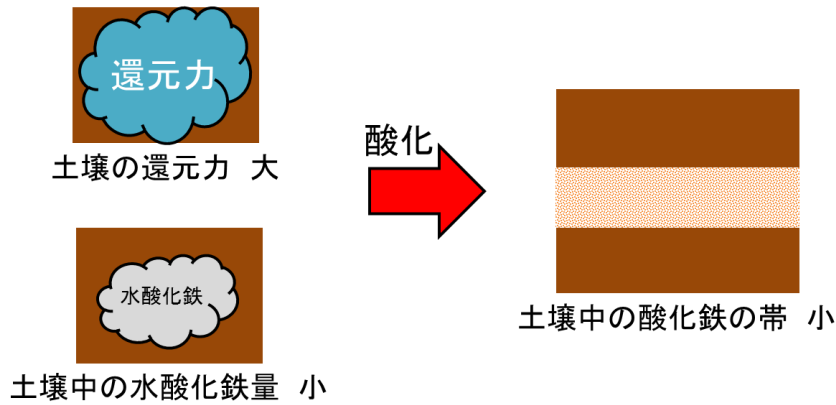
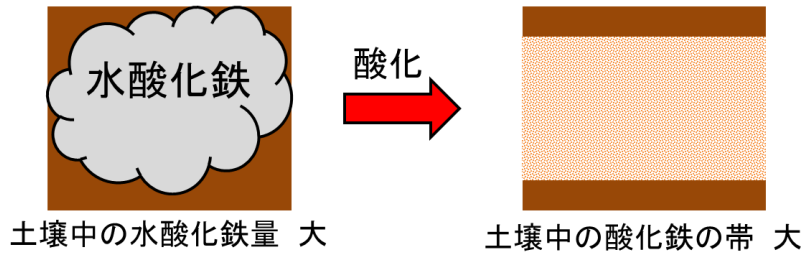


Fig. 1-7 熊田論文での鉄集積に関する模式図(古谷)

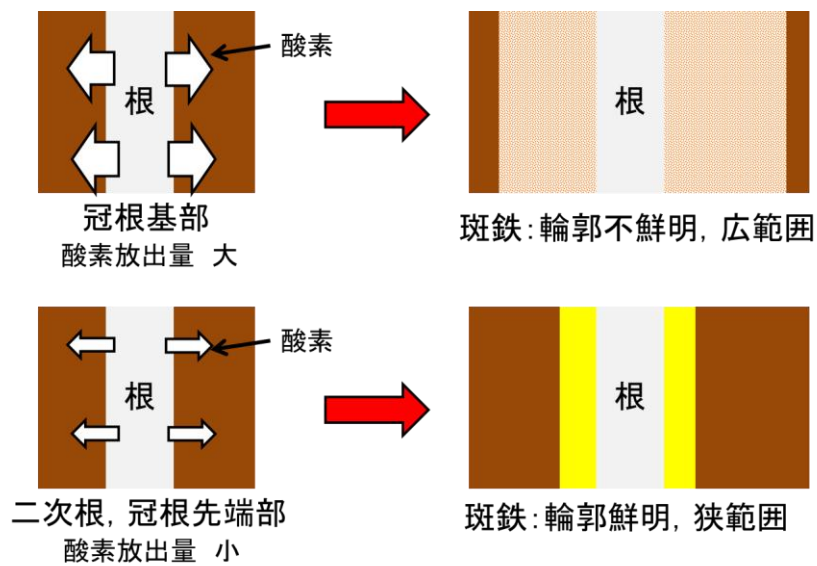


Fig. 1-8 木村らの論文での鉄集積に関する模式図(古谷)

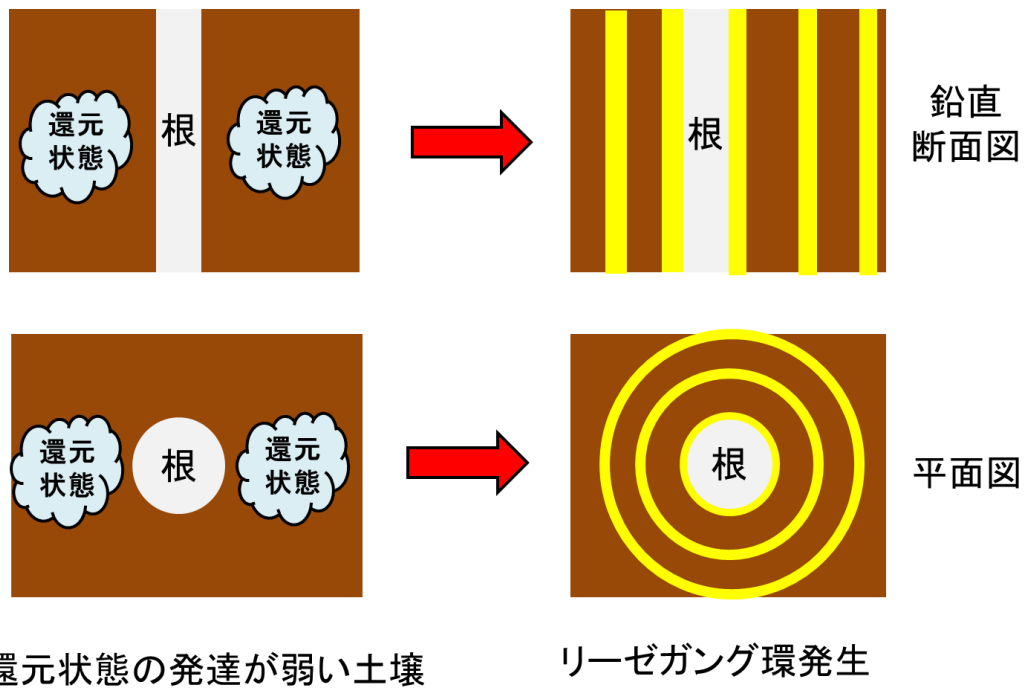


Fig. 1-9 木村らの論文でのリーゼガング現象の模式図(古谷)

2.研究目的

わが国の農業形態は、水田単作から転換畑や、田畑輪換など農地の利用方法が多様化してきている。また、土地の利用方法だけでなく、バイオマスエネルギーや生分解性プラスチック等、農作物の利用方法も多様化している。環境問題や、エネルギー問題といった、食糧自給以外の役割を農業が果たす有用性が出てきており、大区画化しやすく、農業の作業効率の向上をしやすい低地や干拓地での農業の需要が大きくなると考えられる。

そのため、人工的に陸地化した干拓地での、通常の農地では見られない特徴を把握し、干拓地土壌での土層の変化や、実態の解明は農地の高度利用化にとって重要なものとなっている。成岡(1991)は、畑地や水田、転換畑、干拓地と様々な条件下の土壌を比べ違いを整理した。また、佐藤(1992)は、八郎潟の重粘土圃場の土層中の孔隙のつながりを論じた。しかし、八郎潟干拓地は水田の土壌環境、栽培方法など、実態の解明は進んでいるが、有明干拓地のような砂質土壌の干拓地や、八郎潟干拓地以外の古くから行われた干拓地農地土壌の実態解明はあまり進んでいない。

本論では、砂質土壌の干拓地での土層環境や、鉛直の土壌物理的現象などを理解するため、基本的土壌物理性、透水性、限界間隙特性、 pF 水分特性、軟 X 線影像の 5 つの視点から干拓地土壌における粗間隙構造を把握し、土層ごとの粗間隙の接続性、土壌内物質の移動および、土壌内への大気侵入に対する粗孔隙の意義について考察する。

3.研究方法

3.1 調査地

熊本県熊本市海路口町の干拓地農地(緯度：32.7277 度，経度：130.6166 度，標高1.605m)で調査を行った。

この農地は，1800年代に干拓され，有明海に面しており，海拔は2m以下と平坦な地形となっている。

熊本地域硝酸性窒素削減計画書(2005)によると，熊本地域は阿蘇火砕流堆積物が堆積した地質であり，透水性が高く，有害物質なども侵入しやすくなっている。加えて，熊本地域南東部の地下では，割れ目が多く多孔質で水を透しやすい砥川溶岩が分布している。そのため，地下水を蓄える役割と，地下水を速やかに平野へ送る役割を同時に果たしている。

地下水の動態は，まず阿蘇外輪山西麓の山地・丘陵部でかん養され，地下水位分布の極めて平坦な場所に流入する。熊本平野部に達した地下水は，東から西へ有明海に向かって緩やかに流れている(Fig. 3-1, Fig. 3-2)。同図は，地下水の動態を表しており，地下水は有明海へ流入することを示している。

調査対象農地は，干拓当初は水田として利用されていたが，現在はトマト栽培農地として利用されている。この熊本市海路口町，調査圃場地図，調査圃場全体図，および調査地点を Fig. 3-3～Fig. 3-5 に示した。このうち，Fig. 3-3 は熊本市内の調査地の位置，Fig. 3-4 は海路口町の調査地の位置，Fig. 3-5 は調査地の拡大図を示している。また採取した試料は Table 3-1 に示した。

【Fig. 3-1 熊本平野水平方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画，2005)】

【Fig. 3-2 熊本平野鉛直方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画，2005)】

【Fig. 3-3 熊本調査地広域図(引用：Google Map)】

【Fig. 3-4 熊本調査地中域図(引用：Google Map)】

【Fig. 3-5 熊本調査地詳細図(引用：Google Map)】

【Table 3-1 採取試料】

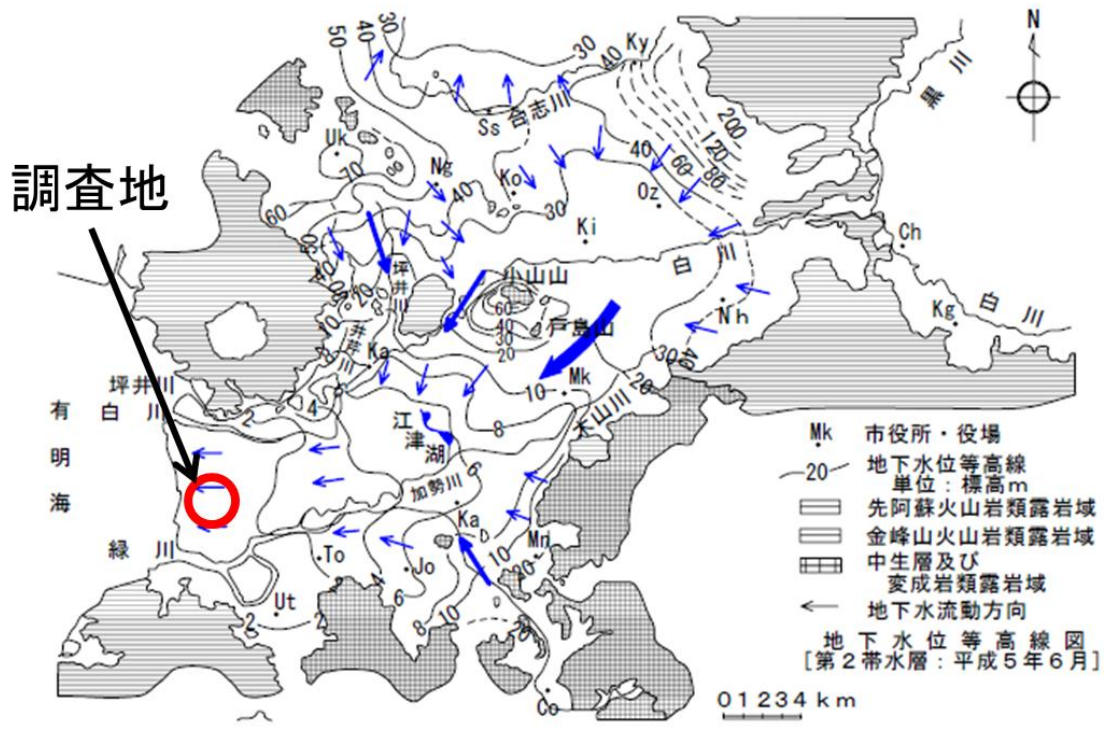
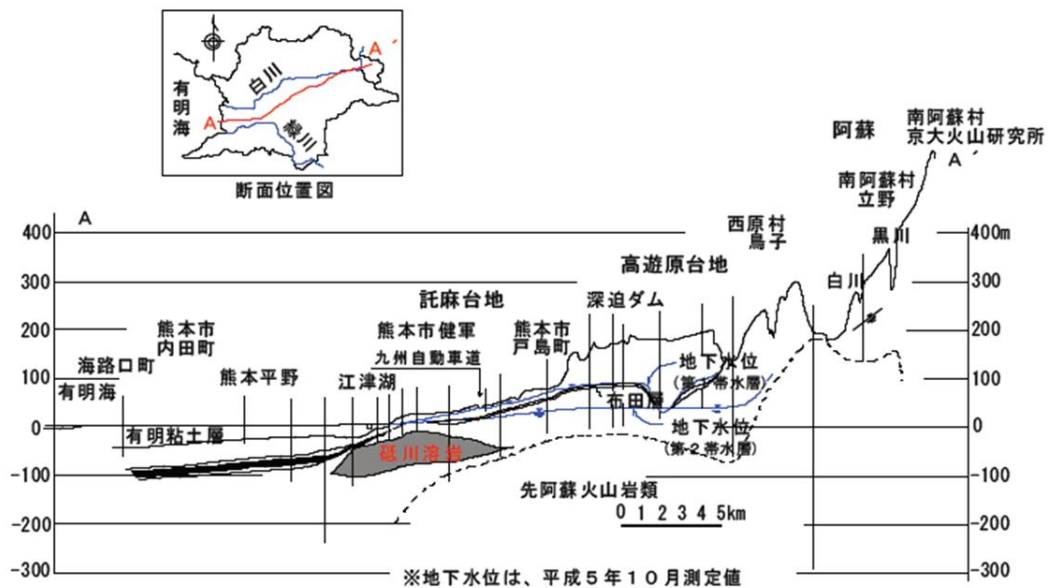


Fig. 3-1 熊本平野水平方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画，2005)

◇熊本地域の地下水断面図



参考) 平成17年「熊本地域地下水保全対策調査報告書」(熊本県・熊本市)

Fig. 3-2 熊本平野鉛直方向の地下水動態(引用：熊本地域硝酸性窒素削減計画，2005)



Fig. 3-3 熊本調査地広域図(引用：Google Map)

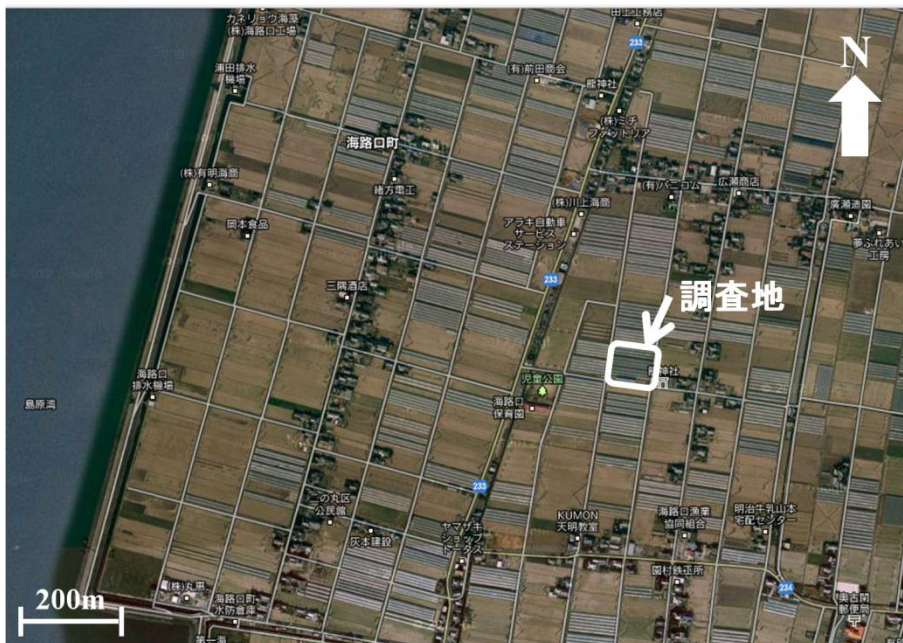


Fig. 3-4 熊本調査地中域図(引用：Google Map)



Fig. 3-5 熊本調査地詳細図(引用：Google Map)

Table 3-1 採取試料

試料採取層番号	不攪乱試料(50cc)					攪乱試料	
	採取方向					袋番号	分量
	水平(H)		鉛直(V)				
	①	②	①	②	③		
I	K1	K2	K3	K4	K5	I	各々 A4×1袋
II	K6	K7	K8	K9	K10	II	
III	K11	K12	K13	K14	K15	III	
IV	K16	K17	K18	K19	K20	IV	
V	K21	K22	K23	K24	K25	V	

Kはサンプル記号を指す

3.2 室内実験

3.2.1 基本的土壌物理性

各層位において、三相割合、土粒子密度、粒度分布、塑性・液性を測定し、層位ごとの平均値を求めた。また、土性はピペット法で測定した。各測定方法は以下のとおりである。

(1) 自然含水比 (ω) ; (JIS A 1203, JGS 0121)

<手順>

- ① 試料を採取し、乾燥させないよう実験室に持ち帰り、そのときの質量(m)をはかった。
- ② 電気炉の温度を 105°C に設定し、24 時間炉乾燥させた。
- ③ 炉乾燥後、試料を室温に戻し、そのときの乾土質量(m_s)をはかった。
- ④ 試料中の水の質量($m_w = m - m_s$)を算出し、3-1 式を用いて自然含水比を求めた。

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100 = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\%) \quad 3-1$$

ただし、

m : 試料の質量 (g), m_s : 試料中の土粒子の質量 (g), m_w : 試料中の水の質量 (g)

(2) 湿潤密度 (ρ_t) ; (JIS A 1202, JGS 0111)

<手順>

- ① 定容積サンプラーで試料を採取し、乾燥させないよう実験室に持ち帰り、そのときの質量(m)をはかった。
- ② 3-2 式を用いて湿潤密度を求めた。

$$\rho_t = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad 3-2$$

ただし、

m_s : 試料中の土粒子の質量 (g), m_w : 試料中の水の質量 (g),

V : 試料全体の体積(cm^3)

(3) 乾燥密度 (ρ_b) ; (JIS A 1202, JGS 0111)

<手順>

- ① 定容積サンプラーで試料を採取し、電気炉の温度を 105°C に設定し、24 時間炉乾燥させた。
- ② 乾燥後、室温に戻しそのときの乾土質量(m_s)をはかった。
- ③ 3-3 式を用いて乾燥密度を求めた。

$$\rho_b = \frac{m_s}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad 3-3$$

ただし、

m_s : 試料中の土粒子の質量 (g), V : 試料全体の体積 (cm^3)

(4) 真比重 (G_s) ; (JIS A 1202, JGS 0111)

<手順>

- ① 比重ビンの質量(m_f)をはかった。
- ② 蒸留水で比重ビンを満たし、その全質量(m_a')と水温 T' をはかった。
- ③ 以上の結果より、3-4式を用いて(m_a)を求めた。
- ④ 蒸発皿の質量をはかり、皿の上で各試料を 10g 以上になるようにはかった。
- ⑤ 試料をそれぞれ比重ビンの中に入れ、蒸留水を半分ぐらいまで入れた。
- ⑥ 砂皿の上で 10 分ほど煮た後、室温(大体 30°C 以下)になるまで冷ました。
- ⑦ 蒸留水でストッパーの小孔の口まで満たして蓋をし、全質量(m_b)と温度 T をはかった。
- ⑧ 蒸発皿に試料を戻し、24 時間乾燥させた後に土粒子の質量(m_s)をはかった。
- ⑨ 3-5式を用いて水温 $T^\circ\text{C}$ に対する土粒子の比重を求め、3-6式を用いて水温 15°C に対する値に換算した。

$$m_a = \frac{\rho_{w,T}}{\rho_{w,T'}} \times (m_a' - m_f) + m_f \quad (\text{g}) \quad 3-4$$

$$G_{s,T} = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \quad 3-5$$

$$G_{s,15^\circ\text{C}} = \frac{\rho_{w,T}}{\rho_{w,15^\circ\text{C}}} \times G_{s,T} \quad 3-6$$

ただし、

m_f : 比重ビンの質量 (g), m_a' : 蒸留水で満たした比重ビンの質量 (g),

m_a : 水温 $T^\circ\text{C}$ における蒸留水で満たした比重ビンの質量 (g),

m_b : 蒸留水と試料の脱気後の質量 (g), $\rho_{w,T}$: $T^\circ\text{C}$ における水の密度 (g/cm^3),

$\rho_{w,15^\circ\text{C}}$: 15°C における水の密度 (g/cm^3)

(5) 間隙率 (n) ; (JIS A 1202, JGS 0111)

<手順>

- ① 3-7 式を用いて土粒子の質量(m_s)から真比重(G_s)を除して、土粒子の体積(V_s)をもとめた。
- ② 全体の体積(V)から土粒子の体積(V_s)を引いたものを間隙の量(V_v)とした。
- ③ 3-8 式を用いて間隙率を求めた。

$$V_s = \frac{m_s}{G_s} \quad (\text{g/cm}^3) \quad 3-7$$

$$n = \frac{V - V_s}{V} \times 100 = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\%) \quad 3-8$$

ただし,

m_s : 試料中の土粒子の質量 (g), V : 試料全体の体積 (cm^3),

V_v : 試料中の間隙の体積 (cm^3), V_s : 試料中の土粒子の体積 (cm^3)

(6) 飽和度 (S_r) ; (JIS A 1202, JGS 0111)

<手順>

- ① 水の密度を(1g/cm^3)とし, $m_w(\text{g})=V_w(\text{cm}^3)$ とした。
- ② 3-9 式を用いて試料中の水の体積(V_w)を間隙の体積(V_v)で除した。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad 3-9$$

ただし,

V_v : 試料中の間隙の体積 (cm^3), V_w : 試料中の水の体積 (cm^3)

(7) 三相割合

<手順>

固相率 : 全体積(V)に対する固体の体積の比率

- ① 3-10 式を用いて試料の固相率を求めた。

$$\frac{V_s}{V} = \frac{m_s}{\rho_s V} \times 100 \quad (\%) \quad 3-10$$

ただし,

m_s : 試料中の土粒子の質量 (g), V : 試料全体の体積 (cm^3),

V_s : 試料中の土粒子の体積 (cm^3), ρ_s : 土粒子密度 (g/cm^3)

液相率 : 全体積に対する液体の体積の比率

- ① 水の密度を(1g/cm^3)とし, $m_w(\text{g})=V_w(\text{cm}^3)$ とした。
- ② 3-11 式を用いて試料の液相率を求めた

$$\frac{V_w}{V} = \frac{m-m_w}{V} \times 100 \quad (\%) \quad 3-11$$

ただし、

m : 試料の質量 (g), m_w : 試料中の水の質量 (g),

V : 試料全体の体積 (cm^3), V_w : 試料中の水の体積 (cm^3)

気相率 : 全体積に対する空気の体積の比率

① 3-12 式より、全体積(V)から土粒子体積(V_s)と水の体積(V_w)を引いた値を空気の体積(V_a)とし、それを全体積(V)で除した。

$$\frac{V_a}{V} = \left(\frac{V-V_s-V_w}{V} \right) \times 100 \quad (\%) \quad 3-12$$

ただし、

V : 試料全体の体積 (cm^3), V_s : 試料中の土粒子の体積 (cm^3),

V_w : 試料中の水の体積 (cm^3), V_a : 試料中の空気の体積 (cm^3)

(8) 粒度分布(JIS A 1204, JGS 0131)

沈降分析においてはピペット法を用いた。

<前準備>

- ① 試料はあらかじめ炉乾燥し、その乾燥重量 m_t を測定した。試料は 10g 程度用いた。
- ② トールビーカーの 500ml の線、またその線から 5cm 下にカラービニールテープで印を付けた。
- ③ 蒸発皿をよく洗浄し、炉乾燥した。炉乾燥後の質量をそれぞれ測定した。
- ④ ピペット法で懸濁液を採取する時間を、3-13 式を用いて以下の条件で計算した。

条件 1) 粒径 0.02mm 以下($d=0.02$)の粒子が水面から 5cm の深度($L=5$)までの沈降するために要する時間。

条件 2) 粒径 0.01mm 以下($d=0.01$)の粒子が水面から 5cm の深度($L=5$)までの沈降するために要する時間。

条件 3) 粒径 0.005mm 以下($d=0.005$)の粒子が水面から 5cm の深度($L=5$)までの沈降するために要する時間。

条件 4) 粒径 0.002mm 以下($d=0.002$)の粒子が水面から 5cm の深度($L=5$)までの沈降するために要する時間。

条件 5) 粒径 0.001mm 以下($d=0.001$)の粒子が水面から 5cm の深度($L=5$)までの沈降するために要する時間。

$$t = \frac{1800 \times \zeta \times L}{(\gamma_s - \gamma_w) \times d^2 \times g} \quad (\text{sec}) \quad 3-13$$

ただし、 t : 沈降時間 (sec), ζ : 水の粘性係数 ($P_a \cdot \text{sec}$), L : 深度 (cm),
 γ_s : 土粒子密度 (g/cm^3), γ_w : 水の密度 (g/cm^3), d : 最大粒径 (mm),
 g : 重力加速度 (cm/sec^2)

<手順>

ピペット法

- ① 2mm の篩を通過した試料の懸濁液が入ったトールビーカーに攪拌子を入れ、スターラーでよく攪拌させた。
- ② 2mm の篩に残留した試料(m_1)を蒸発皿に取った。
- ③ 水温をはかり、条件 1)~5)の沈降速度を求めた。
- ④ トールビーカーを静置すると同時にストップウォッチで採取時間の測定を開始した。
- ⑤ 条件 1)~5)で求めた時間が経過した後、マイクロピペットを使用して水面下 5cm の位置の懸濁液を蒸発皿に 10ml 採取した。
- ⑥ ②, ⑤で取った試料を乾燥炉の温度を 105°C に設定し 24 時間乾燥させ、それ

ぞれ条件(1～(5 順に(m_8) (m_9) (m_{10}) (m_{11}) (m_{12})とし, 乾燥重量測定した。

篩い分け法

- ① ピペット法でトールビーカーに残った試料を 0.85mm, 0.425mm, 0.250mm, 0.106mm, 0.074mm, 0.053mm の篩を目の粗い順で篩別した。
- ② 篩に残留したものを蒸発皿にとった。
- ③ 電気炉を 105°Cに設定し, 24 時間乾燥させ, それぞれの試料を目の粗い篩に残留した順に(m_2) (m_3) (m_4) (m_5) (m_6) (m_7)とし, 乾燥重量を測定した。

粒径分布の算出

以下の計算法を用いて各粒径粒子の割合を求めた。

① 通過粒径割合

通過粒径割合を求めるため, 以下の式より通過粒径質量を求めた。

$$W_{2.000} = m_t - m_1 \quad 3-14$$

$$W_{0.850} = W_{2.000} - m_2 \quad 3-15$$

$$W_{0.425} = W_{0.850} - m_3 \quad 3-16$$

$$W_{0.250} = W_{0.425} - m_4 \quad 3-17$$

$$W_{0.106} = W_{0.250} - m_5 \quad 3-18$$

$$W_{0.074} = W_{0.106} - m_6 \quad 3-19$$

$$W_{0.053} = W_{0.074} - m_7 \quad 3-20$$

$$W_{0.020} = m_8 \times 50 \quad 3-21$$

$$W_{0.010} = m_9 \times 49 \quad 3-22$$

$$W_{0.005} = m_{10} \times 48 \quad 3-23$$

$$W_{0.002} = m_{11} \times 47 \quad 3-24$$

$$W_{0.001} = m_{12} \times 46 \quad 3-25$$

ただし, W_x : 粒径 x mm 以下の残留質量(g)

次に式より, 各粒径の通過粒径割合を求めた。

$$S_x = \frac{W_x}{m_t} \times 100 \quad 3-26$$

ただし, S_x : 粒径 x mm の通過粒径割合(%)

② 土性

以下の式より砂, シルト, 粘土の割合を求めた。

$$\text{砂: } \frac{S_{2.000} - S_{0.020}}{S_{2.000}} \times 100 \quad (\%) \quad 3-27$$

$$\text{シルト: } \frac{S_{0.020} - S_{0.002}}{S_{2.000}} \times 100 \quad (\%) \quad 3-28$$

粘土： $S_{0.002}$ (%)

3-29

これより、求められた砂、シルト、粘土の割合を三角座標にとり、土性を求めた。また、土性判定には Fig.3-6 を使用した。

【Fig. 3-6 三角座標による土性区分(国際土壌学会法)】

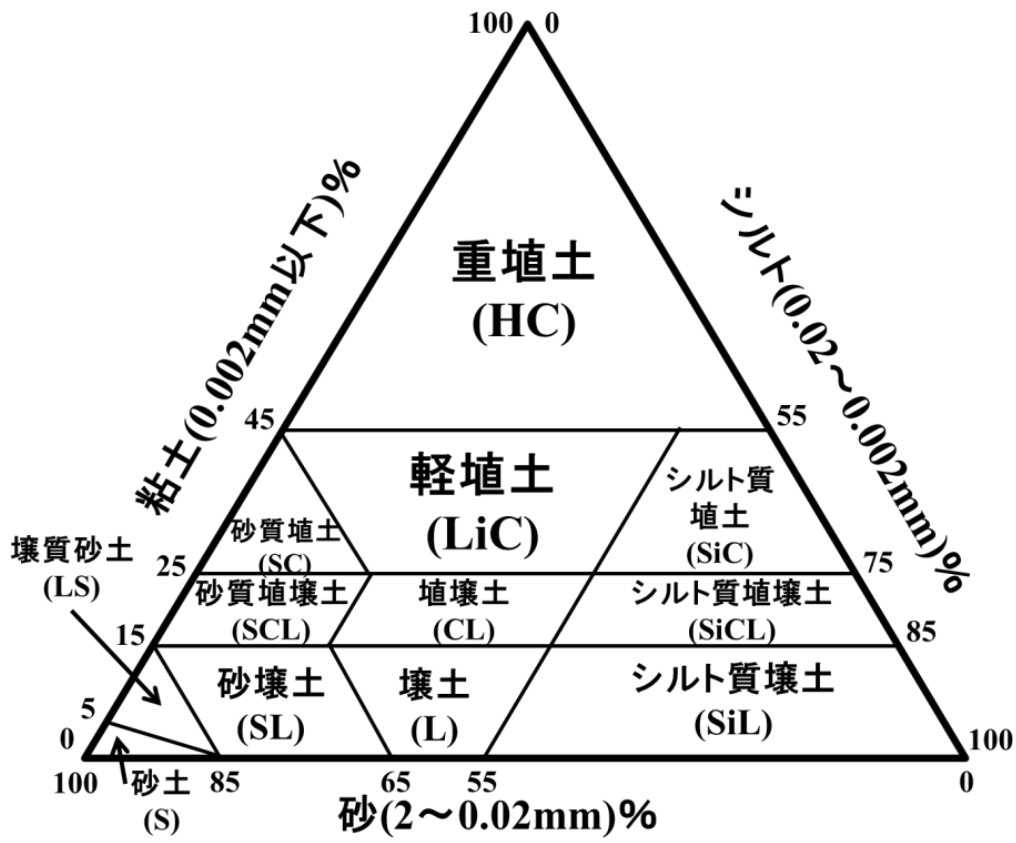


Fig.3-6 三角座標による土性区分(国際土壌学会法)

(9) 液性限界試験(JIS A 1205)

土が塑性体から液体の性質に移るときの境界の含水比を求めた。

<手順>

- ① 液性限界測定器の黄銅皿とゴム台の間にゲージを差し込み、落下高さが 1cm になるように落下装置を調節した。
- ② 試料に蒸留水を入れ練り混ぜた。
- ③ ヘラを用いて試料を黄銅皿に入れ、最大厚さが 1cm になるように形を整えた。
- ④ 溝切りを黄銅皿の底に直角に保ちながら、皿の中心線を通るように試料を 2 分した。
- ⑤ 落下装置のハンドルを回し、1 秒間に 2 回の割合で黄銅皿を持ちあげては落とした。
- ⑥ 溝の底部の試料が約 1.5cm 合流した時の落下回数を記録し、合流した付近の試料の含水比を測定した。
- ⑦ 落下回数 25～35 回のもものが 3 個、10～25 のもものが 3 個得られるまで含水比を調整し、繰り返し試験を行った。

(10) 塑性限界試験(JIS A 1205)

土が塑性体から半固体に移るときの含水比を求めた。

<手順>

- ① 試料が団子状になる程度に、含水比を調整し十分に練り混ぜた。
- ② 試料を楕円形のボール状にし、手のひらとすりガラス板の間で転がし、ひも状にした。
- ③ ひもの太さが 3mm になるまで、さらに細くした。
- ④ この土のひもが直径約 3mm で切れぎれになった時、その切れぎれの土を集めて含水比を測定した。
- ⑤ ①～④を繰り返し、4 回分含水比を測定した。

(11) 塑性指数

塑性指数 I_p は、液性限界 w_L と塑性限界 w_p の差であり、次式から求めた。

$$I_p = w_L - w_p \quad 3-30$$

塑性指数 I_p と液性限界 w_L を用いて塑性図を作成した。

【Fig.3-7 塑性図と力学的性質(引用：土質試験－基本と手引き－)】

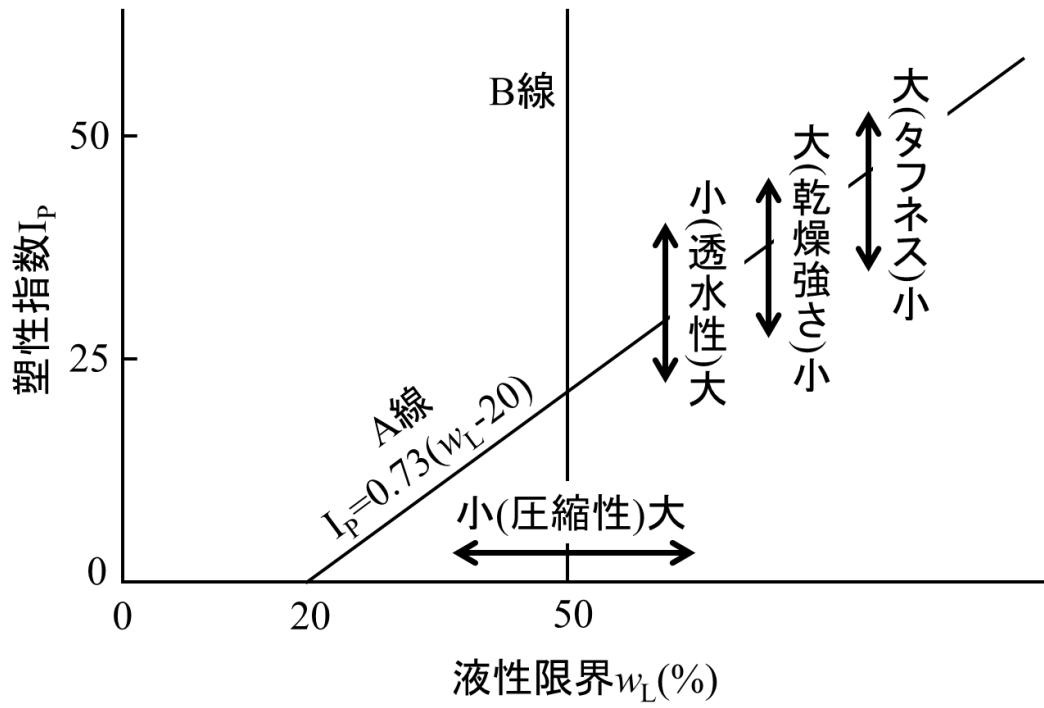


Fig.3-7 塑性図と力学的性質(引用：土質試験－基本と手引き－)

3.3.2 透水試験

飽和透水係数 (k) (JIS A 1218, JGS 0311)

採土後、試料の質量を測定した。透水試験には定水位法を用いた。装置の概要図を Fig.3-8 に示す。

<手順>

- ① サンプラーの内径,長さ(l)および質量を測定し,試料断面積($A\text{cm}^2$)を計算した。
- ② プレッシャーキャップをつけ,マリオット給水装置で給水し,試料を飽和させた。
- ③ 飽和が完了したら,プレッシャーキャップの上をつけて給水した。
- ④ プレッシャーキャップの上下からのびたチューブの水頭差($h\text{cm}$)で給水し,そのときの排水量($Q\text{cm}^3$)を測定した。
- ⑤ 水温(T)を計測した。
- ⑥ 透水係数 k を計算した。 k は次式で求める。

$$k = \frac{Q}{At} \frac{l}{h} \quad (\text{cm/s}) \quad 3-31$$

ただし,

k : 飽和透水係数 (cm/s), Q : 排水量 (cm^3), A : 試料断面積 (cm^2),
 l : 試料長 (cm), t : 測定時間 (sec), h : 湛水面と排水面の高さの差 (cm)

- ⑦ 前述⑥で算出した透水係数の温度補正を行い,水温が 20°C の場合の飽和透水係数に換算した。

$$C = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad 3-32$$

$$k_{20} = k \times C \quad (\text{cm/s}) \quad 3-33$$

ただし,

C : 水温補正係数, μ_T : $T^\circ\text{C}$ における水の粘性係数,
 μ_{20} : 20°C における水の粘性係数, k_{20} : 20°C における飽和透水係数

【Fig. 3-8 定水位透水試験装置図(増井原図, 古谷加筆)】

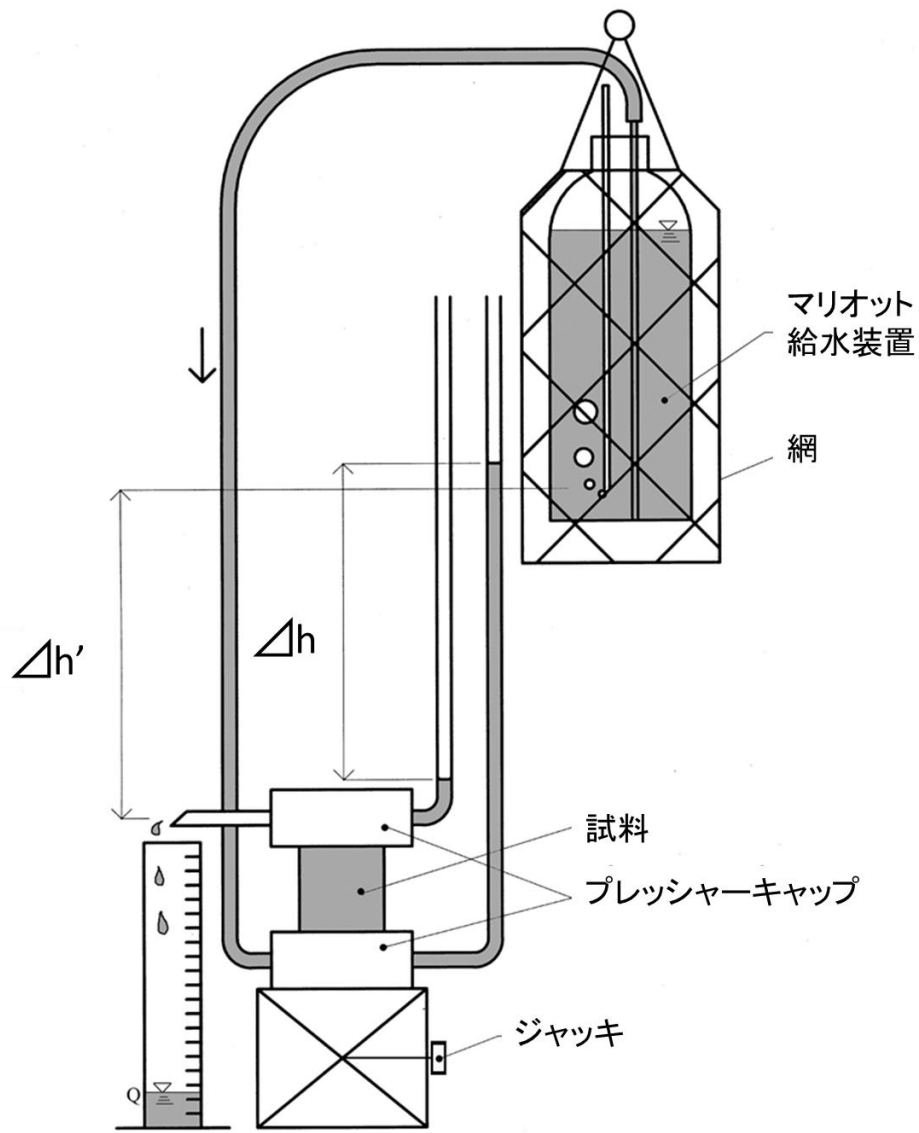


Fig.3-8 定水位透水試験装置図(増井原図, 古谷加筆)

3.3.3 限界負圧試験

(1) 限界負圧

吸引法により、試料の限界負圧を測定した。装置全体図を Photo 3-1 に示す。

<手順>

- ① 試料下面にストッキングを張り、24 時間毛管飽和させた。
- ② 蒸留水を煮沸し、ガラス瓶に入れ水冷した。この水を脱気水として利用した。
- ③ 圧力キャップとサンプラーの密閉度を高めるために、圧力キャップの底面、壁面にグリスを塗った O リングを装着した。
- ④ 試料のストッキングを外し、試料両面の縁にベントナイトを微量につけ、その上に網フィルターを固定した。
- ⑤ 試料両面に圧力キャップをはめ、装置を組み立てた。
- ⑥ 脱気水をボトルに入れ、装置下部から脱気水で満たし、上部から水が出てくるまで給水した。
- ⑦ 試料土基準面と排水位のレベルを一致させた。
- ⑧ ⑦の状態では平衡になるまで待機し、負荷圧ゼロ時の排水を捨て、排水がなくなった状態から開始した。
- ⑨ 以下順次段階的(1cm(H₂O)/min)に負荷を増大させ、各負荷段階の平衡状態確認の上脱水量を測定した。
- ⑩ 試料末端界面に気泡が連続的に発生したことを確認して、その時点の負荷圧と脱水量を記録後実験を終了した。

(2) P_k-脱水曲線

限界負圧試験より得られたデータを、負荷圧 H(kPa)を横軸、積算脱水量 Σq を縦軸に取り、脱水曲線を描いた。模式図を Fig. 3-9 に示す。

【Fig. 3-9 P_k-脱水曲線の模式図】

【Photo 3-1 装置全体図】

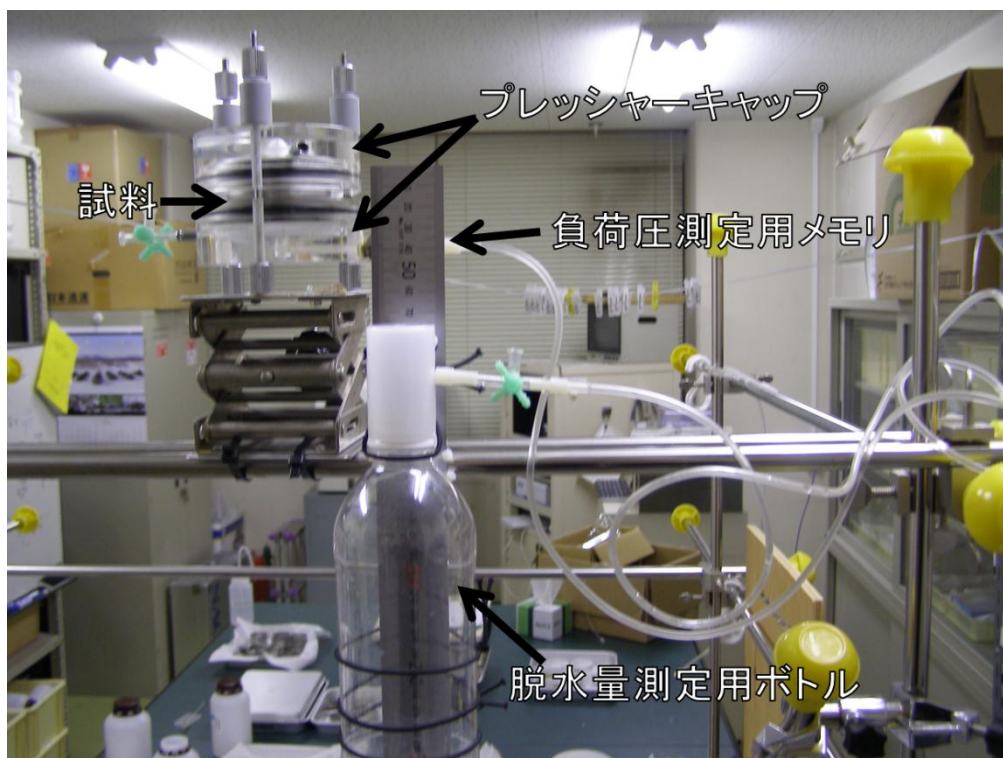


Photo 3-1 装置全体図

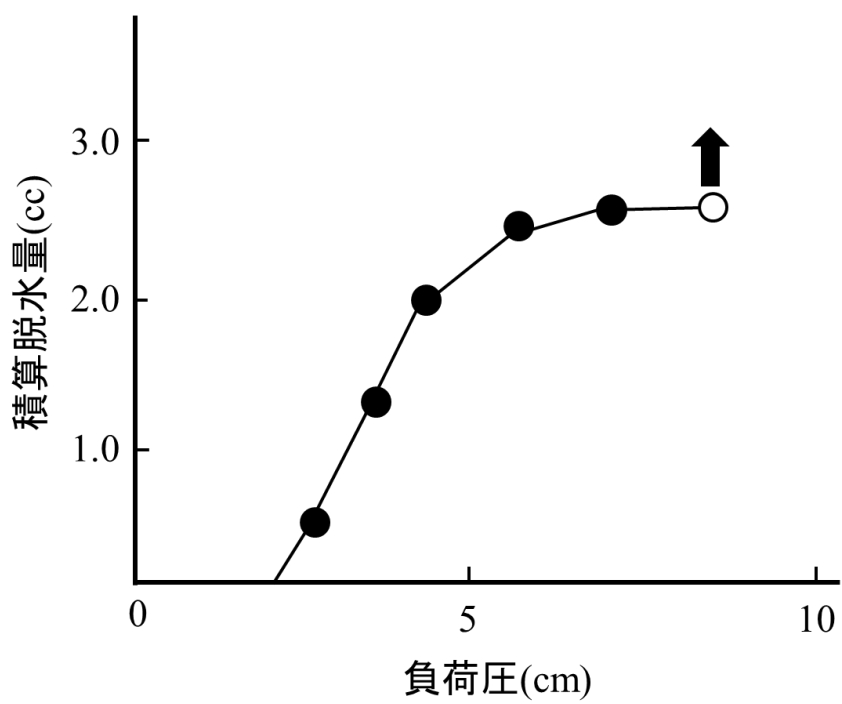


Fig. 3-9 P_k -脱水曲線の模式図

3.3.4 土壌水分特性試験

pF は土壌水の保持力を表す表示方法の一つである。

pF は土壌の保水性の測定、土壌の植物有効利用水分の算定などに用いられる。また、土壌物理性の諸指標など土壌の水分状態との相互関係を基準化するために用いられる。

pF は土壌が保持している水分を取り出すために必要な力(サクション)を水柱の高さ[Hcm]に換算し、それを常用対数として表す。p は対数、F は自由エネルギーを表している。

$$pF = \log_{10} H$$

3-34

本論では pF 測定のために加圧板法を用いた。

密封した試料室に圧力 P_1 を加え、素焼板を境にして大気圧 P_0 に接する自由水と土壌水を接続させる。この P_1 と P_0 の圧力差によって土壌水は P_0 側に流出し、土壌の吸引圧が P_1 に対応する水分状態で平衡に達する。加圧法は土壌水に任意の正圧を与えて、水圧の低い自由水側に脱水を促す方法といえ、リチャードによって考案された(土壌物理測定法委員会,1978)。

(1) pF 測定

50cc 円筒で不攪乱採取した試料について、加圧板法を適用した。装置図、装置概要図を Photo 3-2, Fig.3-10 に示した。

<前準備>

- ① 排水バルブ、排気バルブを締めてフィルターの飽和を行った。
- ② 50cc サンプラーの片側にストッキングを取り付け、ストッキング側の面を水に浸して、24 時間毛管飽和状態にした。

<手順>

- ① 試料からストッキングを丁寧に外し、その面にろ紙を敷いた。
- ② 試料とろ紙、フィルターが密着するように置いた。
- ③ 蓋を閉めて排気バルブ、排水バルブを閉め、給気バルブと自動圧力調節器をつなぐホースを接続した。
- ③ 換算表から、測定したい pF 値に対する設定値を自動加圧装置に入力した。
- ④ 加圧を開始し、給気バルブを開けた。
- ⑤ 以上の状態で、水の流出がなくなるのを待った。
- ⑥ 水の流出がなくなったのを確認し、給気バルブを閉め、自動圧力調整器を止めて排水バルブをゆっくりと開けた。

- ⑦ 給気バルブをゆっくりと開け，ホースを外し，蓋を開けた。
- ⑧ 金属ヘラなどを使い，丁寧に試料を取り出した。
- ⑨ アルミホイルをひいたはかりに載せ，重さをはかった。
- ⑩ 質量に変化がなければ圧力を引き上げて次の段階に進んだ。
- ⑪ すべての負圧帯の測定が終了した後，試料を温度 105℃に設定した電気炉で，24 時間炉乾燥した。

(2) 体積含水率

<手順>

- ① 水の重量を以下の式から求めた。

$$\text{水の重量} = \text{湿潤総重量} - (\text{乾燥重量} + \text{サンプラー重量}) \quad 3-35$$

- ② 以下の式から体積含水率を求めた。

$$\text{体積含水率 } \theta = \frac{\text{水の重量}}{\text{サンプラーの体積}} \times 100 \quad 3-36$$

(3) pF- θ 曲線および pF 水分分布曲線

求められたデータより，pF- θ 曲線および水分分布図を描いた。

pF- θ 曲線は，縦軸に pF を取り，横軸に体積含水率 $\theta(\%)$ を取りグラフを描いた。

pF 水分分布曲線は，縦軸に $\Delta\theta / \Delta pF$ を取り，横軸に $d(\text{mm})$ を取りグラフを描いた。ただし， $d(\text{mm})$ はジュレンの式を使用した。

$$d(\text{mm}) = \frac{0.3}{H(\text{cm})} \times 10 \quad 3-37$$

【Fig. 3-10 装置概要図】

【Photo 3-2 pF 装置図】

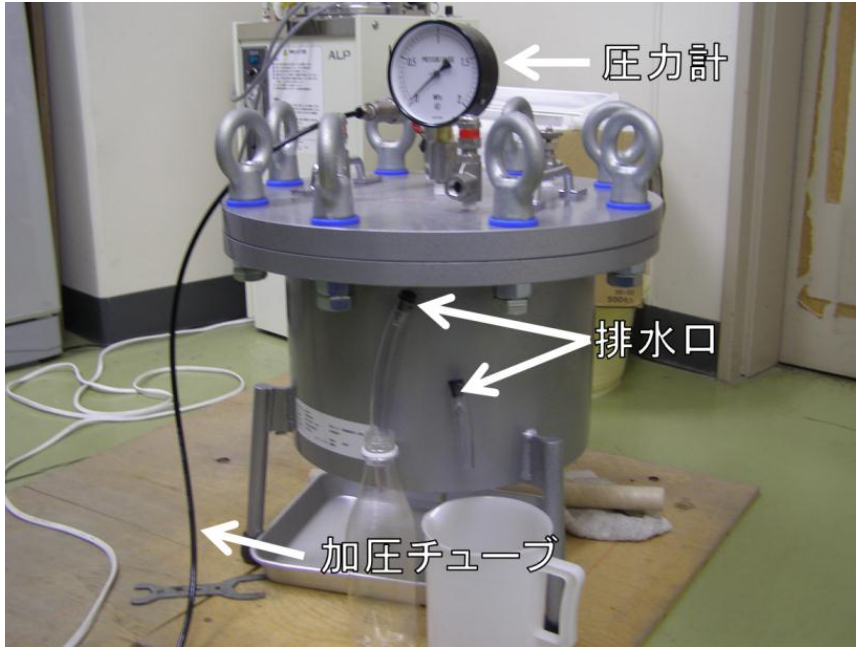


Photo 3-2 pF 装置図

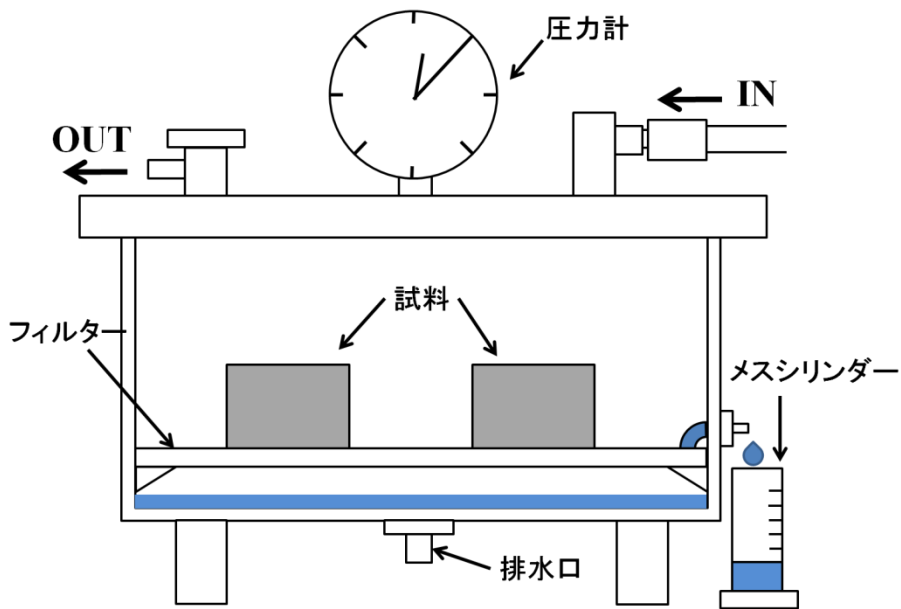


Fig. 3-10 装置概要図

3.3.5 軟 X 線画像法

(1) 試料の準備

試料は調査地で採土した、50cc サンプラーの不攪乱試料を使用した。

(2) 軟 X 線撮影

撮影条件は、管電圧 60kV、管電流 2.0mA、照射時間 240s に設定し、撮影を行った。フィルム現像では自動現像機の設定を液温 28°C、現像時間 3 分とした。装置は Photo 3-3~Photo 3-5 を使用し、装置概要を Table 3-1 に示した。

<手順>

- ① 撮影台にフィルムをセットした。
- ② 撮影台の上に、試料、フィルムマーカを置いた。
- ③ 撮影台を水平にセットし、水準計も水平になるように調整した。
- ④ 上記の撮影条件で軟 X 線撮影を行った。
- ⑤ 撮影を終えた軟 X 線フィルムを現像機に入れて現像した。

また、軟 X 線映像と比較を行うため、軟 X 線撮影終了後にデジタルカメラでの撮影も行った。デジタルカメラで撮影した際、焦点を一致させるため、Photo3-6 のスタンドでデジタルカメラを固定して一定距離を保って撮影を行った

(3) 軟 X 線影像のデジタル化

X 線フィルムは透過光による読影に対して最適化されているため、反射光による読み取りでは十分なコントラストを確保できない。そのため、フィルムを透過フィルムに取り付け、ライトボックスをフィルム上に重ね、Fig. 3-11 のようにスキャナで取り込んだ。

<手順>

- ① Fig. 3-11 のように、スキャナーで取り込むため、取り込み位置を合わせやすいよう、厚紙でフィルムを固定した。
- ② フィルムを固定した厚紙をスキャナーに配置した。
- ③ 厚紙の上にライトボックスを置き、鮮明にフィルム画像を取り込めるようにした。
- ④ ライトボックスの電源を入れ、スキャナーでフィルム映像を取り込んだ。

【Fig. 3-11 スキャナーによる画像取り込み方法(廣住原図)】

【Photo 3-3 コンテナ配置】

【Photo 3-4 軟 X 線発生装置(DCTS7003;SOFTEX 社)】

【Photo 3-5 自動現像機(HI-RHEIN;NIX 社)】

【Photo 3-6 スタンド(デジタルカメラ撮影用)】

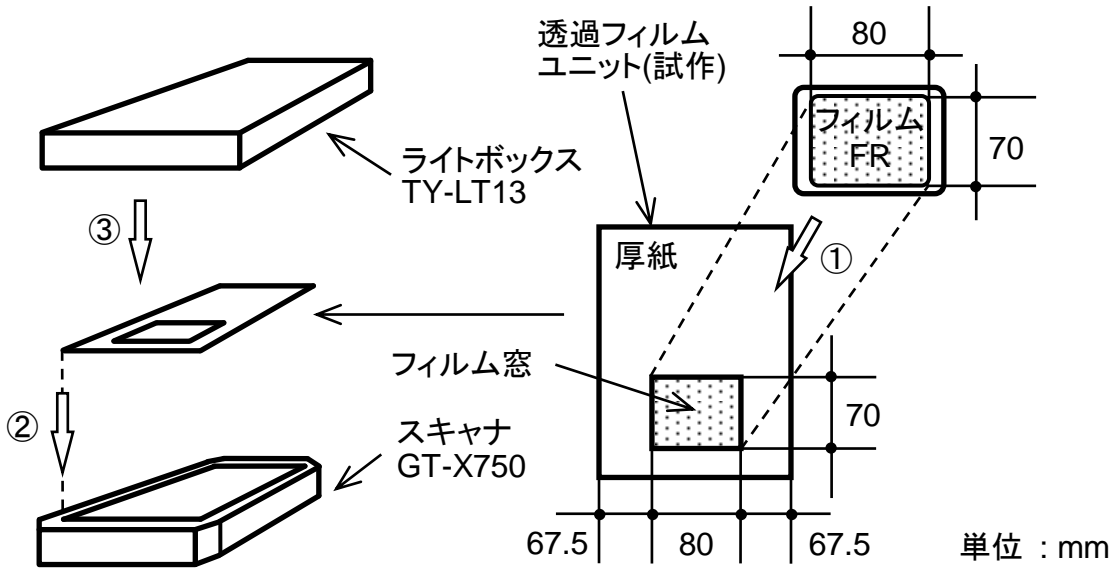


Fig.3-11 スキャナーによる画像取り込み方法(廣住原図)



Photo 3-3 コンテナ配置



Photo 3-4 軟 X 線発生装置(DCTS7003;SOFTEX 社)



Photo 3-5 自動現像機(HI-RHEIN;NIX 社)

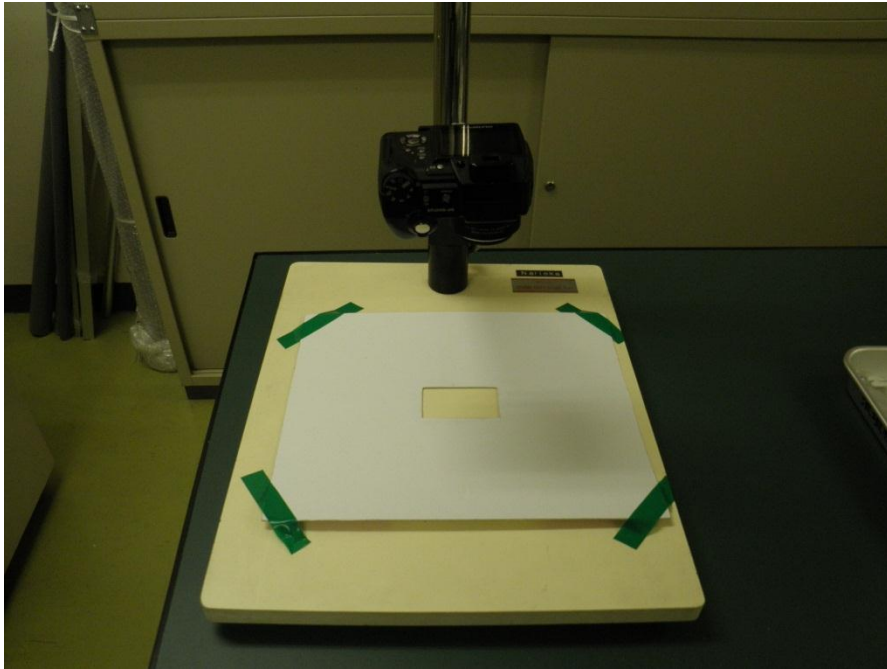


Photo 3-6 スタンド(デジタルカメラ撮影用)

3.3.6 土壌面密度測定

土壌面密度とは、「土壌の単位面積あたりの固層の質量」として、次式のように定義される(廣住, 2012)。

$$\rho_A = \frac{M_S}{A_t} \quad 3-38$$

ただし, ρ_A : 土壌面密度(kg m⁻²), M_S : 固相の質量(kg), A_t : 面積(m²)

土壌面密度 ρ_A はある平面範囲に含まれる土粒子の量を示す値である。この面密度を縦軸に、軟 X 線撮影で得た検量線用の土壌試料影像の濃度階調値を横軸に取った検量線を作り、軟 X 線撮影で得た不攪乱試料の軟 X 線影像を面密度で表現できる。これにより、微小面積の密度の大小を測定することができる。

面密度測定では、軟 X 線撮影をデジタル X 線センサ NAOMI-NX(アールエフ社製)で行い、大まかに Fig. 3-12 の順序で解析を行った。

(1) 試料の準備

<手順>

- ① 使用するセルの質量をはかった。
- ② 50cc サンプラーの不攪乱試料を移し替えるセルの寸法を測った(Photo 3-7, Photo 3-8)
- ③ セルに移し替えられるよう、土壌サンプルを成形した(Photo 3-9)。
- ④ セルに移し替えた後、土壌サンプルから切り離し、撮影面を綺麗に整えた(Photo 3-10)。
- ⑤ 試料を詰めたセルの質量をはかった。
- ⑥ 残った試料は、検量線作成に使用するために残した。

(2) 軟 X 線撮影

撮影はフィルム撮影ではなく、NAOMI-NX によるデジタル撮影を行った。これにより、スキャナーによる画像取り込みを省略した。

撮影条件は、管電圧 42kV、管電流 0.5mA、照射時間 2s に設定し、撮影を行った。

<手順>

- ① NAOMI-NX を装置内に水平になるように設置した(Photo 3-11)。
- ② NAOMI-NX の上に試料を設置した(Photo 3-12)。
- ③ 上記の撮影条件で撮影した。
- ④ 撮影した画像を TIF 形式で保存した。

(3) 検量線用の試料準備

<手順>

- ① 検量線作成用に残した試料をかき混ぜ、均一な土壌にした。
- ② セルに様々な密度で試料を詰め、撮影面を平らになるよう整えた。
- ③ 試料を詰めたセルの質量をはかった。
- ④ 撮影用の試料を4つ作成し、上記と同条件で軟 X 線撮影をした。

(4) 試料の乾燥重量測定

<手順>

- ① 蒸発皿の質量を測定した。
- ② 撮影し終えた試料を蒸発皿に移した。
- ③ 蒸留水を使い、セルに付着した試料を蒸発皿に移した。
- ④ 蒸発皿に移した試料を 105°C に設定した電気炉に入れ、24 時間乾燥させた。
- ⑤ 乾燥した試料の質量を測定した。

(5) 画像の数値化

TIF 形式の画像の 1pixel ごとの値を CSV ファイルにするため、INRIA 製数値計算システム Scilab-4.1.2 および、Scilab 用画像処理ツールボックス SIP-0.4.0 を使用した。

<手順>

- ① 撮影した軟 X 線画像の試料部分を切り取り、TIF 形式で保存した。
- ② 加工した画像を Scilab により CSV ファイルに変換した。

(6) 土壌面密度グラフ作成

3D グラフを作成するため、フリーのグラフ作成ソフト「Gunplot 4.6」を使用した。

<手順>

- ① 検量線用試料の乾燥重量を縦軸に、CSV により数値化した画像の平均濃度階調値を横軸にとって、グラフを描いた。
- ② 複数点から近似式を求め、その式を検量線とした。
- ③ 検量線を使用し、不攪乱土壌試料の CSV ファイルの濃度階調値を、土壌面密度に変換した。
- ④ 変換した値を Gunplot 4.6 を使いグラフを描いた(Fig. 3-13)。

- 【Fig. 3-12 画像解析の手順】
- 【Fig. 3-13 面密度 3D グラフ例図】
- 【Photo 3-7 セル幅の測定】
- 【Photo 3-8 セル高さの測定】
- 【Photo 3-9 土壌サンプル作成過程】
- 【Photo 3-10 撮影表面の成形】
- 【Photo 3-11 NAOMI-NX の設置】
- 【Photo 3-12 面密度試料の設置】

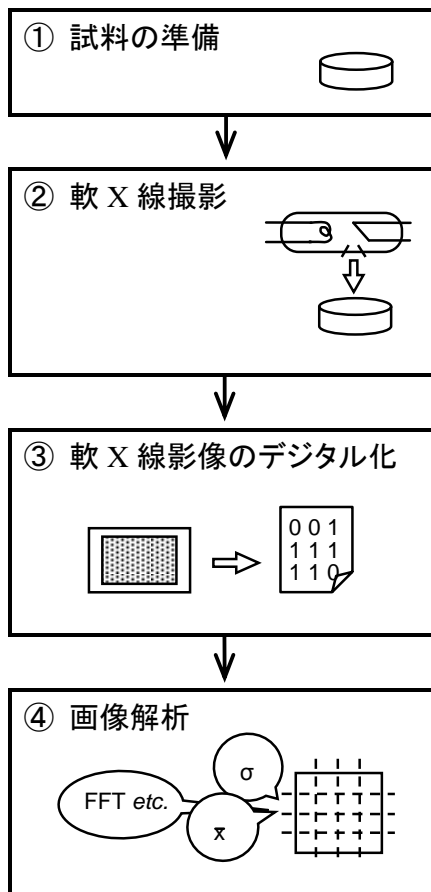


Fig. 3-12 画像解析の手順(廣住原図)

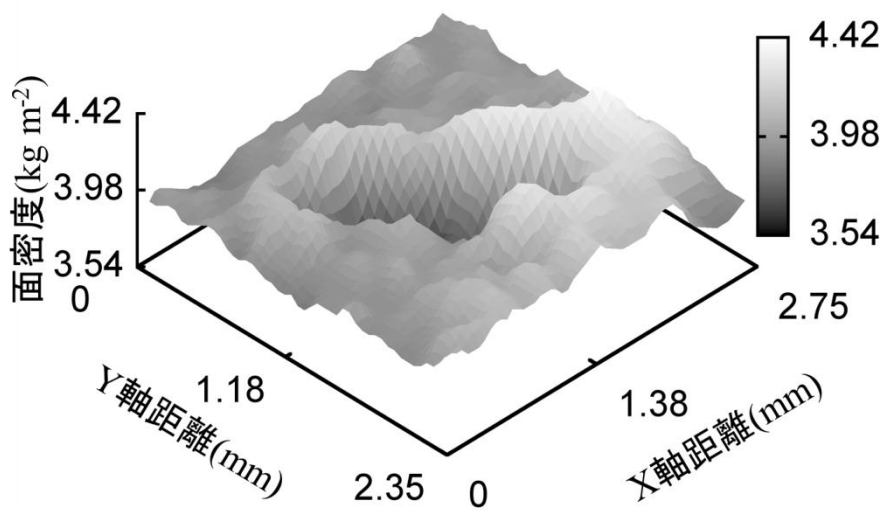


Fig. 3-13 面密度 3D グラフ例図

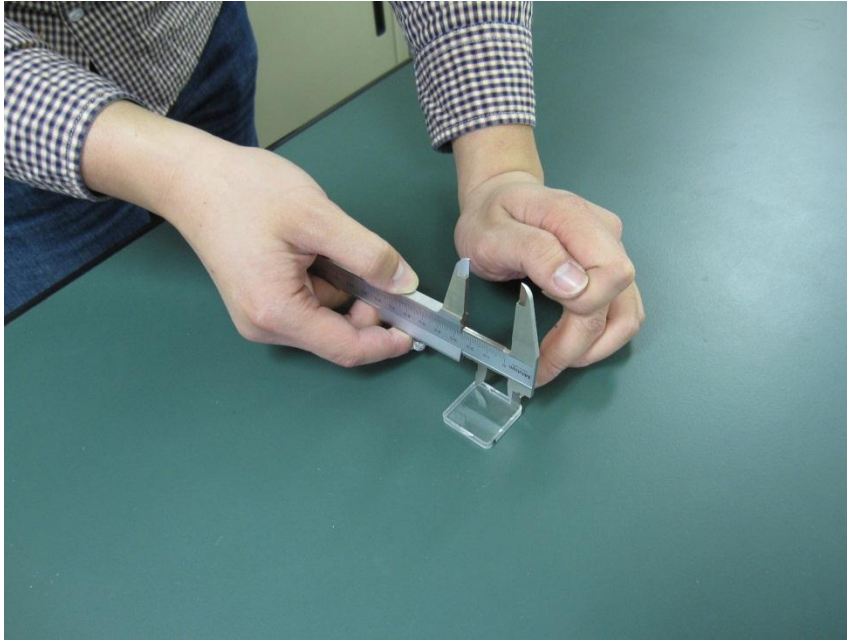


Photo 3-7 セルの幅測定

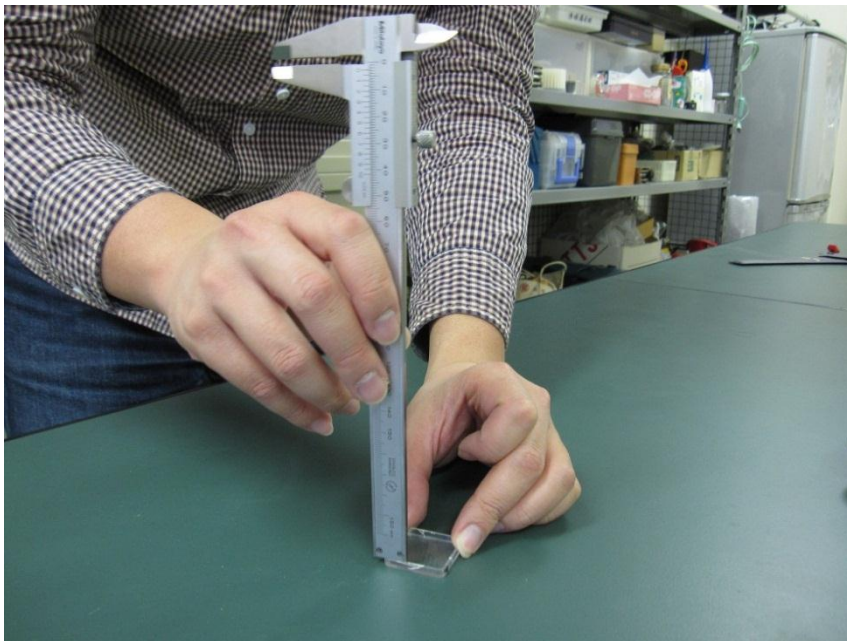


Photo 3-8 セルの高さ測定



Photo 3-9 土壤サンプル作成過程



Photo 3-10 撮影表面成形



Photo 3-11 NAOMI-NX 設置

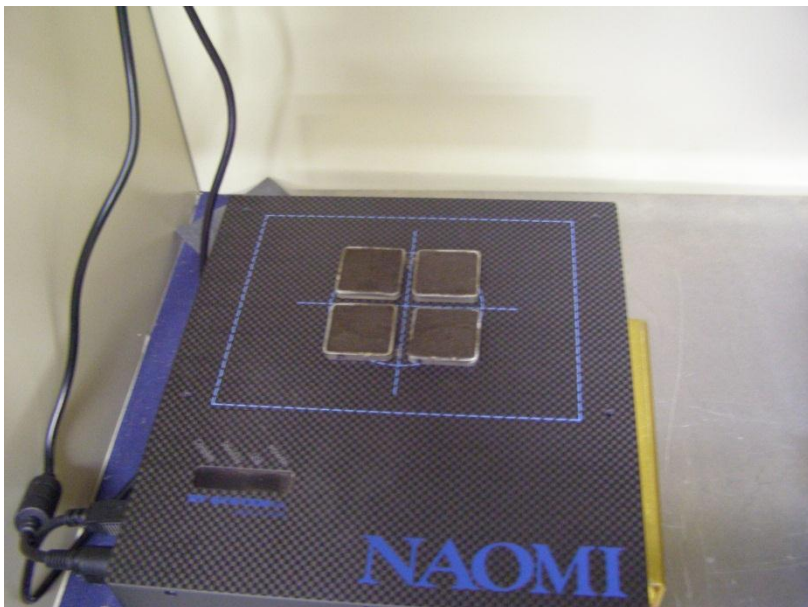


Photo 3-12 面密度試料設置

4.結果

4.1 調査現場

土壌調査による土壌断面写真を Photo 4-1 から Photo 4-4 に示す。また、斑鉄層が形成されている層を鉛直方向から撮影した写真を Photo.4-5, Photo 4-6 に示す。また、触診法、カラーチャートにより得られた土性、土色と土壌断面の関係を Fig. 4-1 に、山中式硬度計による土壌断面の硬度分布を Fig. 4-2 に各々示す。Fig.4-1 にある土性は、触診法による判定であったため、後日室内研究により土性を調べた。

Fig. 4-1, Fig. 4-2 より、調査対象土壌は、作土層 0～13cm の深さに縦方向の亀裂に富み、20～40cm の深さでは斑鉄層が見られた。特に 20～27cm は斑鉄が多く分布していた。40cm 以深は壁上の層となり、1cm 程の管状孔隙が見られた。全土層について、主に砂分が多かった。

Photo 4-2 より、作土層は、上層において亀裂が入り、断面も壁状ではなく凹凸があるが、下層においては壁状となり、締め固まったような断面であった。Photo 4-3, Photo 4-5, Photo 4-6 より、耕盤層付近に斑鉄が卓越していた。また、鉛直方向では点状に、土壌断面画像では線状に分布していることから、管状斑鉄は鉛直方向に分布していた。

【Photo 4-1 土壌断面】

【Photo 4-2 土壌断面作土層近景】

【Photo 4-3 土壌断面耕盤層近景】

【Photo 4-4 土壌断面心土層近景】

【Photo 4-5 斑鉄層鉛直方向画像】

【Photo 4-6 斑鉄層鉛直方向近景】

【Fig. 4-1 土壌断面調査】

【Fig. 4-2 土壌断面硬度分布(山中式硬度計)】



Photo 4-1 土壤断面

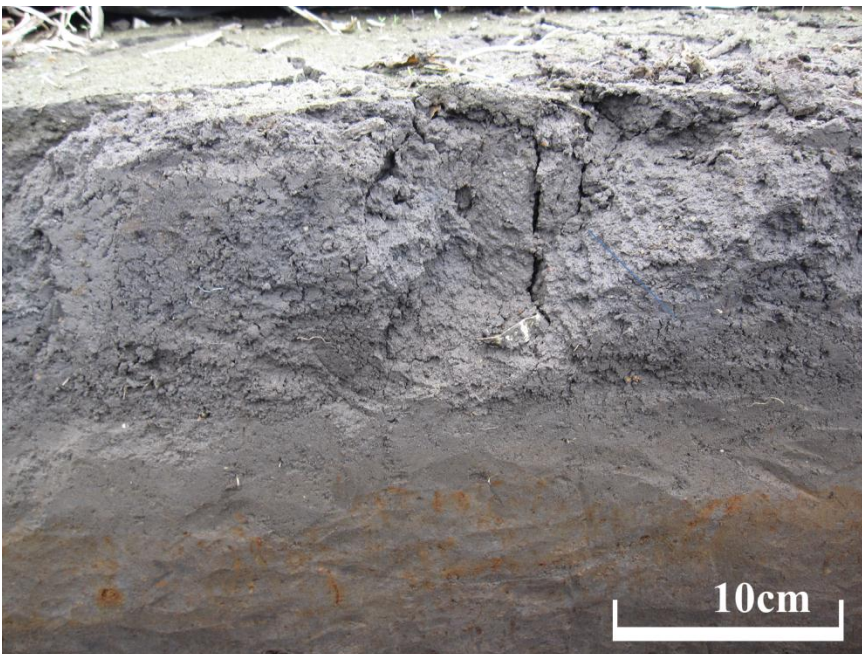


Photo 4-2 土壤断面作土層近景

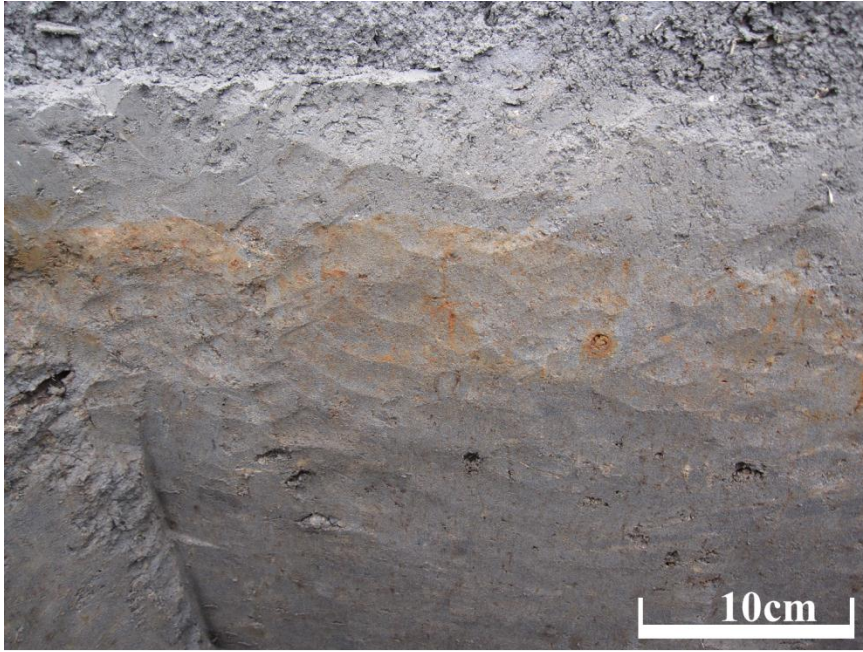


Photo 4-3 土壤断面耕盤層近景

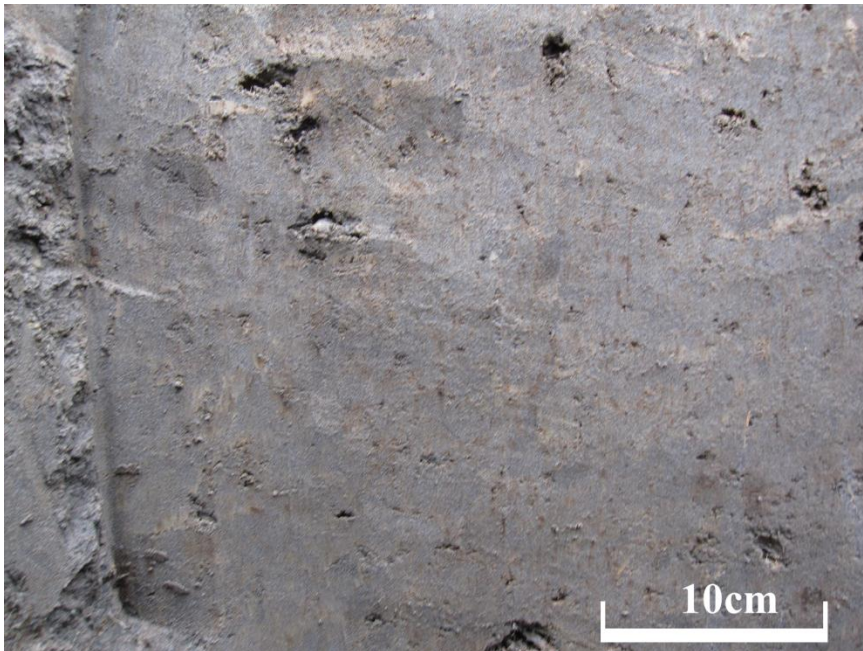


Photo 4-4 土壤断面心土層近景



Photo 4-5 斑鉄層鉛直方向画像



Photo 4-6 斑鉄層鉛直方向近景

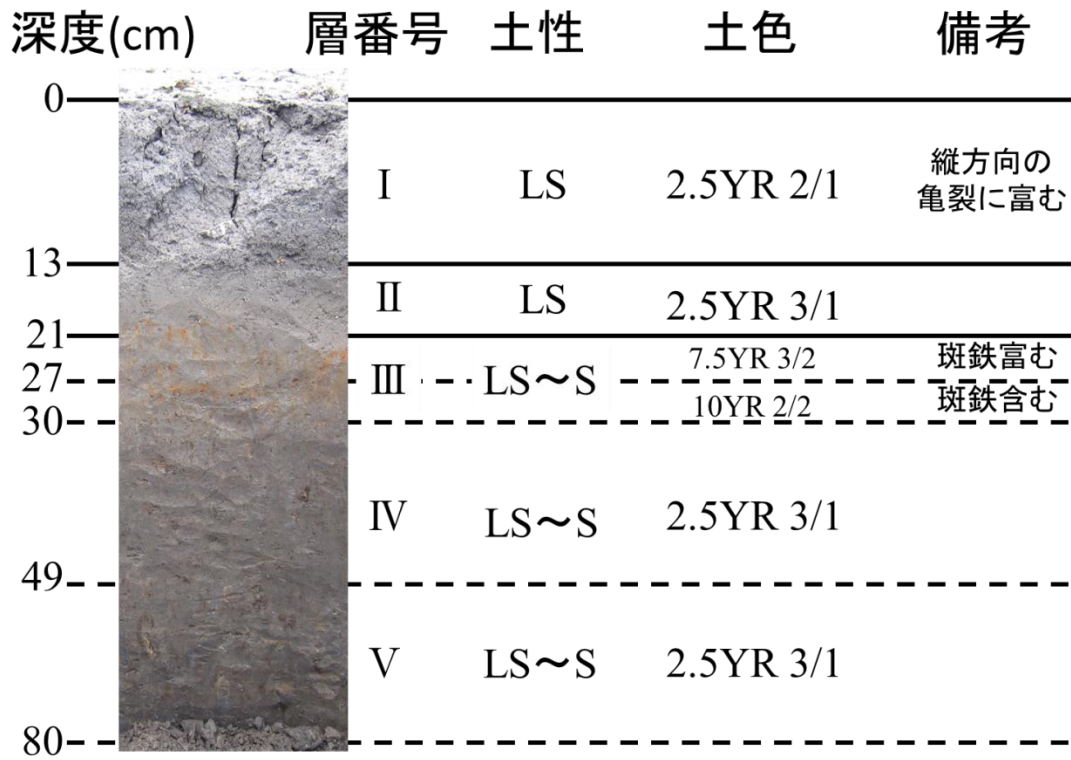


Fig. 4-1 土壤断面調査図

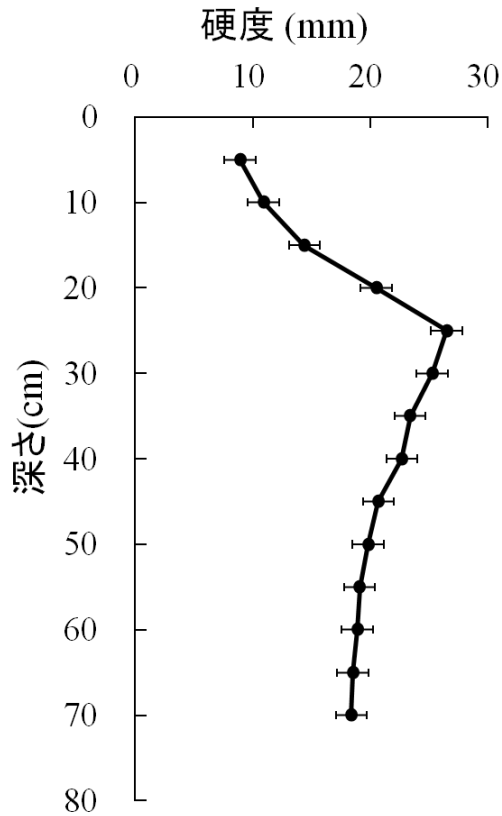


Fig. 4-2 土壤断面硬度分布(山中式硬度計)

4.2 室内実験

4.2.1 基本的土壌物理性

基本的土壌物理性の測定結果を Table4-1, Table4-2, Fig. 4-3～Fig. 4-22 に各々示す。

Fig. 4-3～Fig. 4-7 より, 三相割合では, 固相割合は全層で類似の割合となったが, IV層, V層では気相率が減り, 液相率が増える傾向を示した。

Fig. 4-8～Fig. 4-12 より, 粒度分布曲線は全土層について類似の傾向を示した。どの土層も, 細砂(0.2～0.02mm)の分布が多い。

Fig.4-13～Fig.4-17 より, 全土層で砂分が多い土性を示した。土性の変化は, 粘土含量の微妙な変化によって変わっている。

Table 4-1, Fig.4-18～Fig.4-22 より, 塑性・液性について全土層で類似の傾向を示した。しかし, 塑性指数はかなり低い値を示した。

Table 4-2 より, 間隙率は全土層について類似の傾向であり, 土粒子密度については, 耕盤層であるⅢ層が大きく, 他の層は一律であった。

【Table 4-1 塑性・液性試験結果】

【Table 4-2 基本的物理性結果】

【Fig. 4-3 三相分布図(熊本Ⅰ層)】

【Fig. 4-4 三相分布図(熊本Ⅱ層)】

【Fig. 4-5 三相分布図(熊本Ⅲ層)】

【Fig. 4-6 三相分布図(熊本Ⅳ層)】

【Fig. 4-7 三相分布図(熊本Ⅴ層)】

【Fig. 4-8 粒度分布曲線(熊本Ⅰ層)】

【Fig. 4-9 粒度分布曲線(熊本Ⅱ層)】

【Fig. 4-10 粒度分布曲線(熊本Ⅲ層)】

【Fig. 4-11 粒度分布曲線(熊本Ⅳ層)】

【Fig. 4-12 粒度分布曲線(熊本Ⅴ層)】

【Fig. 4-13 土性(熊本Ⅰ層)】

【Fig. 4-14 土性(熊本Ⅱ層)】

【Fig. 4-15 土性(熊本Ⅲ層)】

【Fig. 4-16 土性(熊本Ⅳ層)】

【Fig. 4-17 土性(熊本Ⅴ層)】

【Fig. 4-18 塑性図(熊本Ⅰ層)】

【Fig. 4-19 塑性図(熊本Ⅱ層)】

【Fig. 4-20 塑性図(熊本Ⅲ層)】

【Fig. 4-21 塑性図(熊本Ⅳ層)】

【Fig. 4-22 塑性図(熊本Ⅴ層)】

Table 4-1 三相割合，塑性・液性試驗結果

試料名	(%)		
	塑性限界 W_P	液性限界 W_L	塑性指数 I_P
熊本 I 層	27	39	12
熊本 II 層	24	38	14
熊本 III 層	25	38	13
熊本 IV 層	26	36	10
熊本 V 層	28	30	2

Table 4-2 基本的物理性結果

試料名	乾燥密度 ρ_b (Mgm^{-3})	湿潤密度 ρ_{soil} (Mgm^{-3})	含水比 ω ($kgkg^{-1}$)	間隙率 n (m^3m^{-3})	間隙比 e (m^3m^{-3})	飽和度 s (m^3m^{-3})	土粒子 密度 (Mgm^{-3})
熊本 I 層	1.24	0.43	0.35	0.55	1.24	0.78	2.772
熊本 II 層	1.25	0.43	0.34	0.55	1.20	0.79	2.759
熊本 III 層	1.24	0.45	0.36	0.56	1.27	0.80	2.806
熊本 IV 層	1.28	0.48	0.38	0.54	1.17	0.89	2.764
熊本 V 層	1.22	0.47	0.39	0.56	1.25	0.85	2.748

熊本 I 層

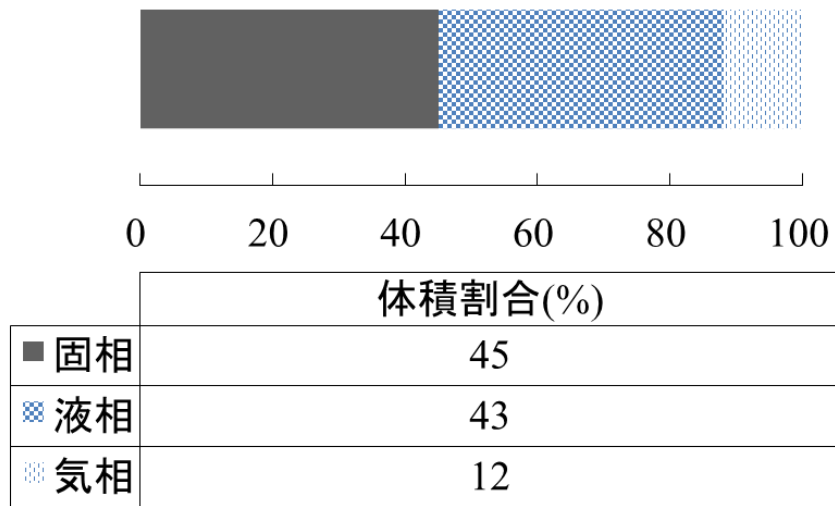


Fig. 4-3 三相分布図(熊本 I 層)

熊本 II 層

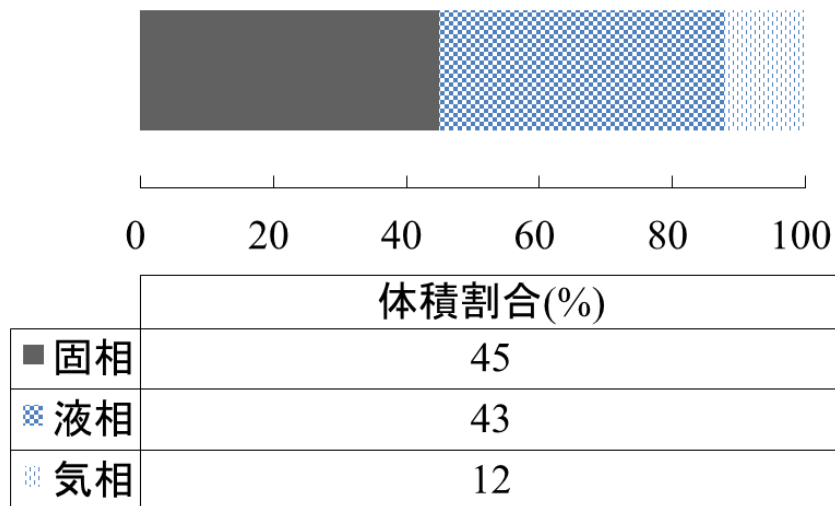


Fig. 4-4 三相分布図(熊本 II 層)

熊本Ⅲ層

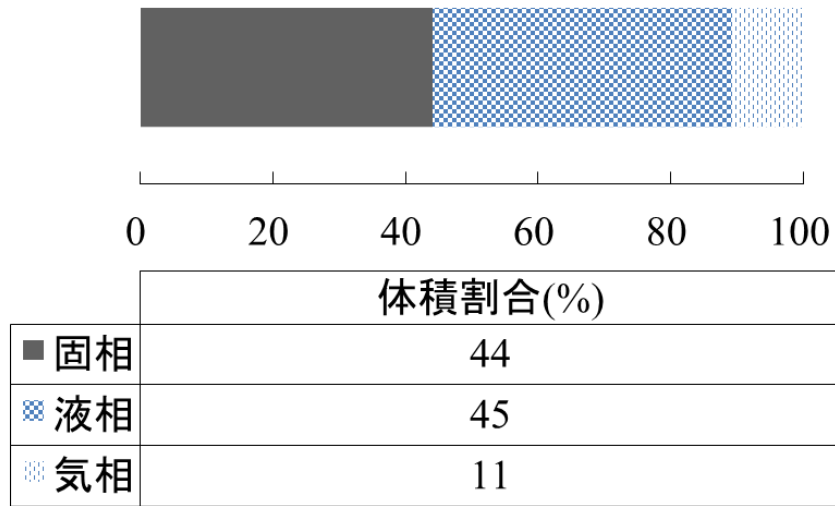


Fig. 4-5 三相分布図(熊本Ⅲ層)

熊本Ⅳ層

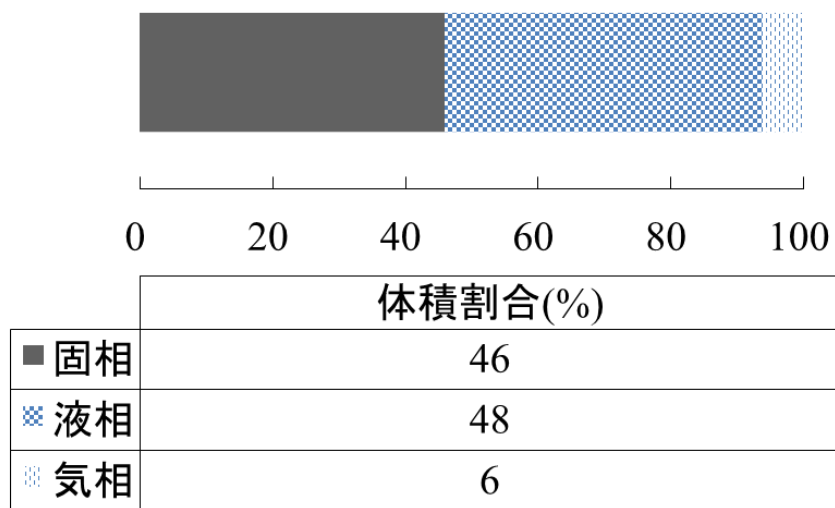


Fig. 4-6 三相分布図(熊本Ⅳ層)

熊本V層

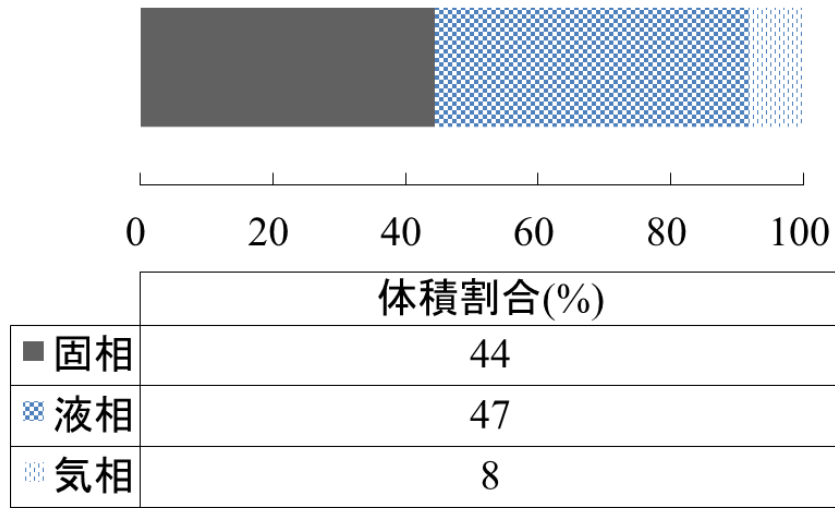


Fig. 4-7 三相分布図(熊本V層)

熊本I層

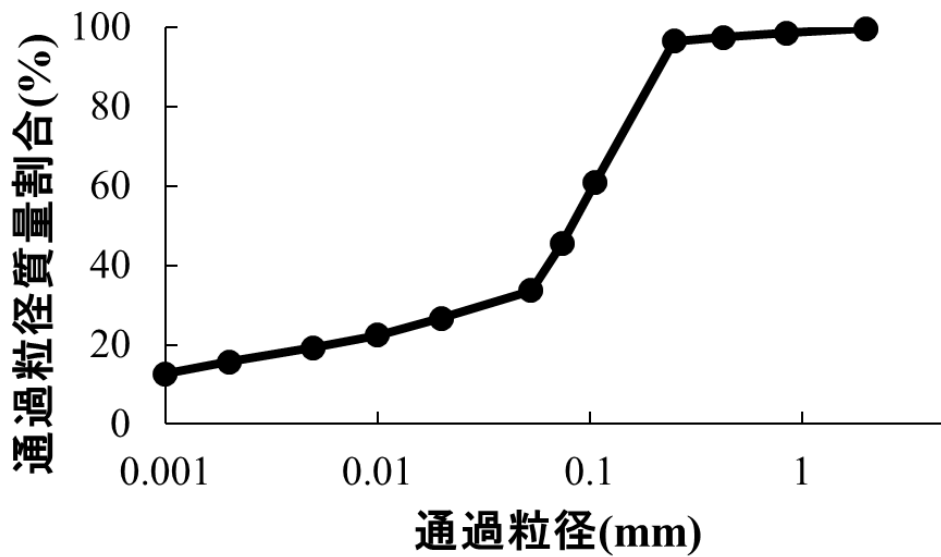


Fig. 4-8 粒度分布曲線(熊本I層)

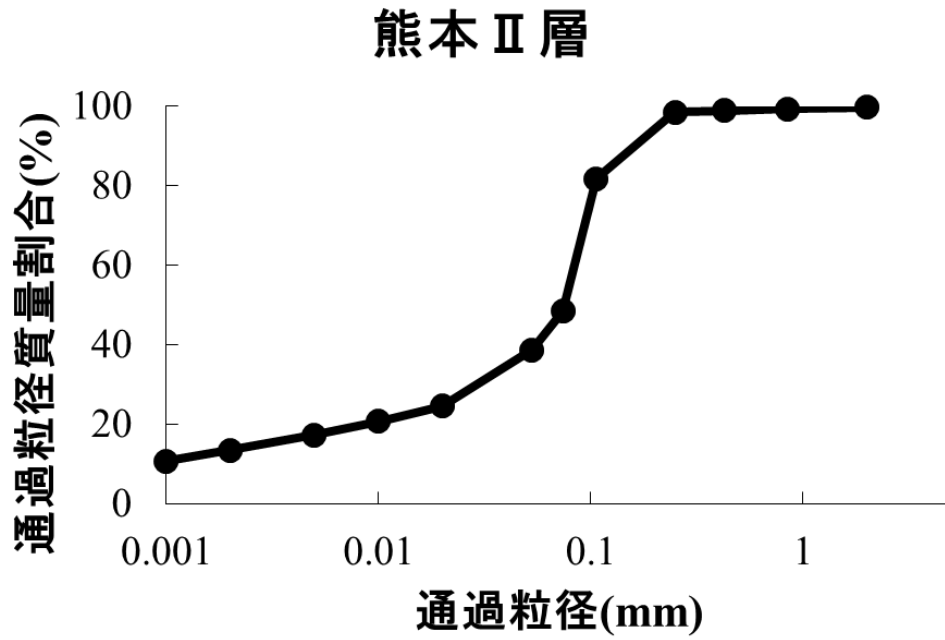


Fig. 4-9 粒度分布曲線(熊本Ⅱ層)

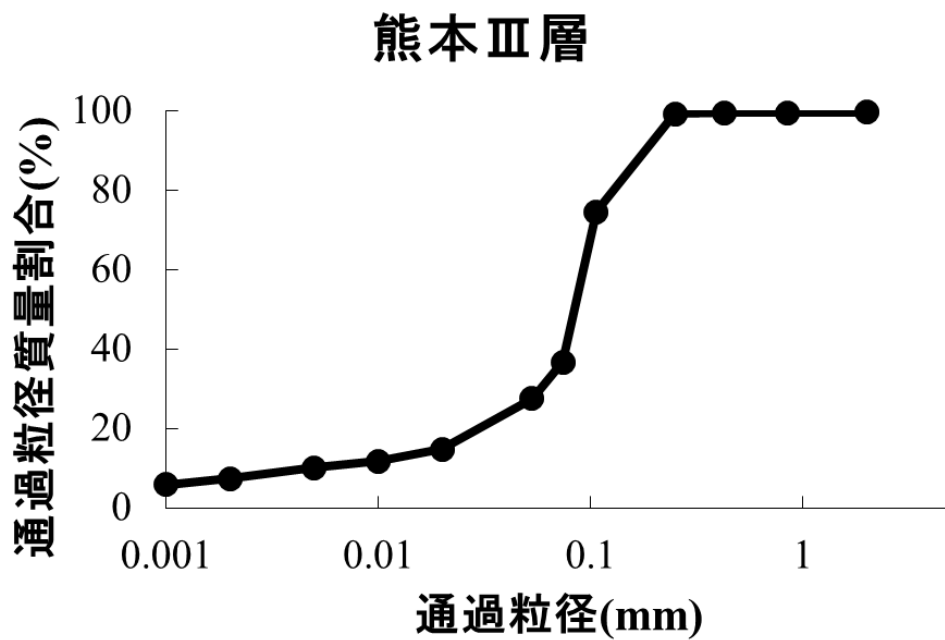


Fig. 4-10 粒度分布曲線(熊本Ⅲ層)

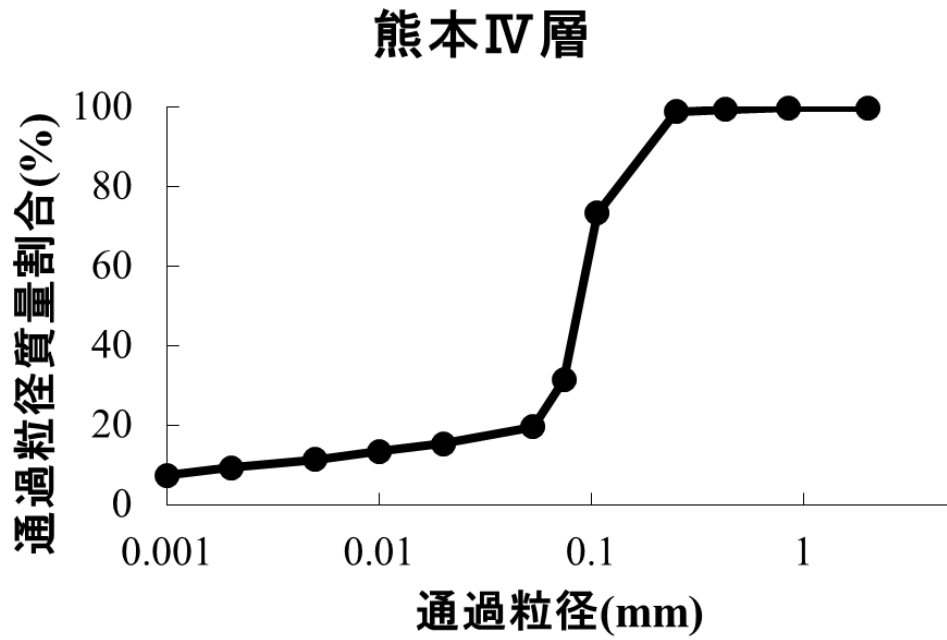


Fig. 4-11 粒度分布曲線(熊本IV層)

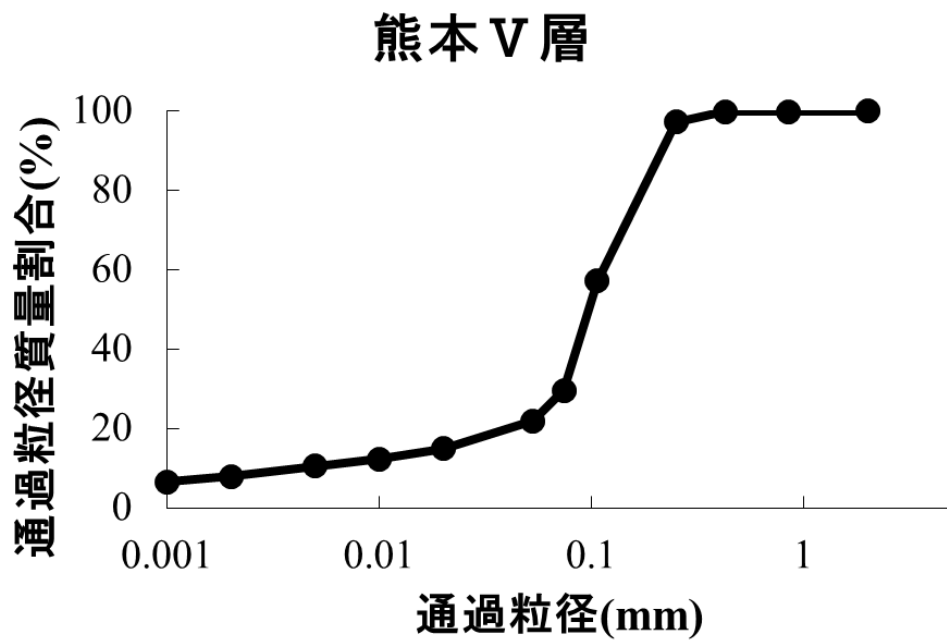


Fig. 4-12 粒度分布曲線(熊本V層)

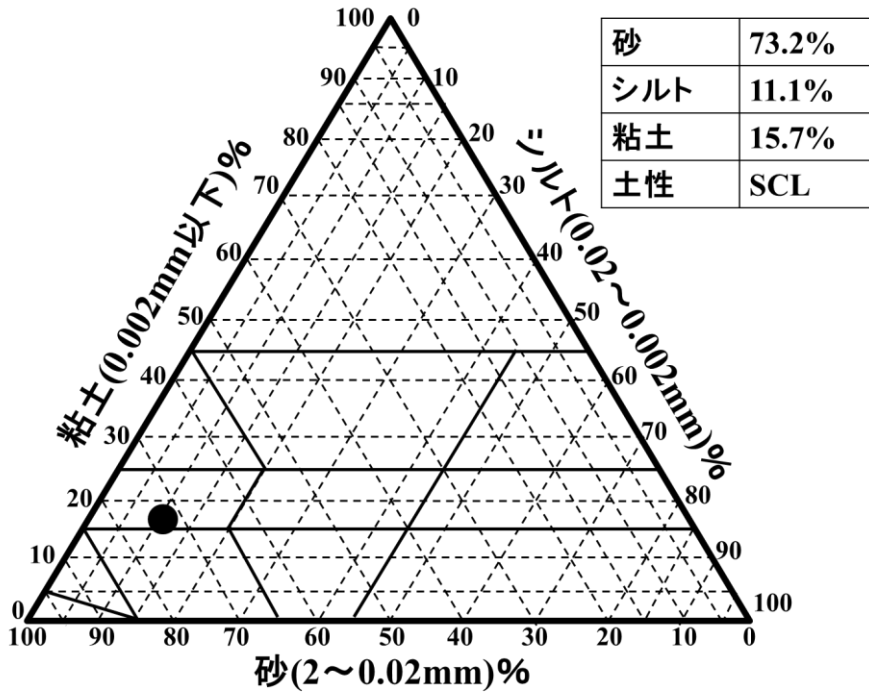


Fig. 4-13 土性(熊本 I 層)

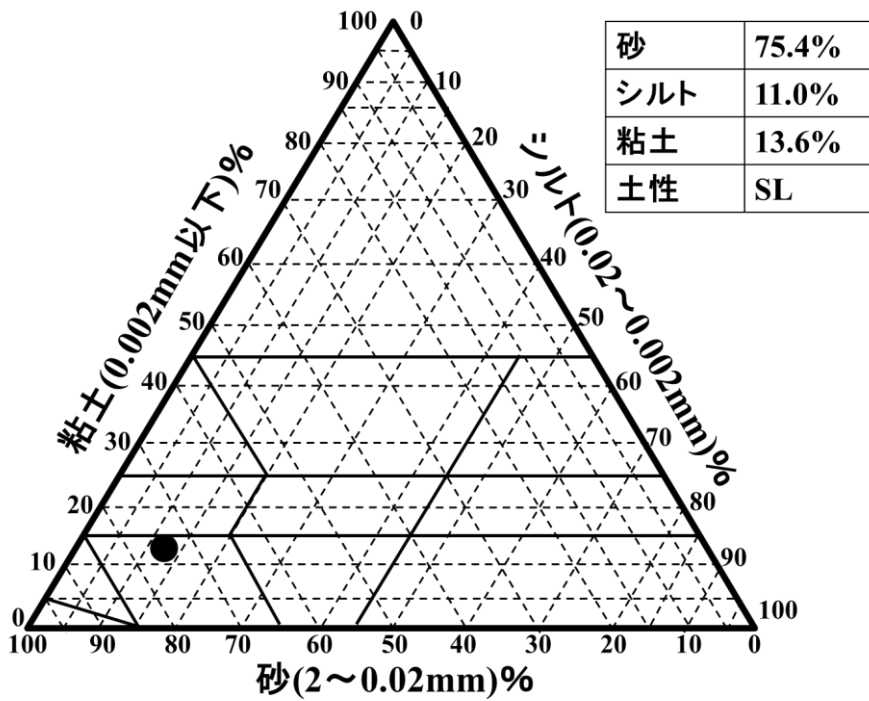


Fig. 4-14 土性(熊本 II 層)

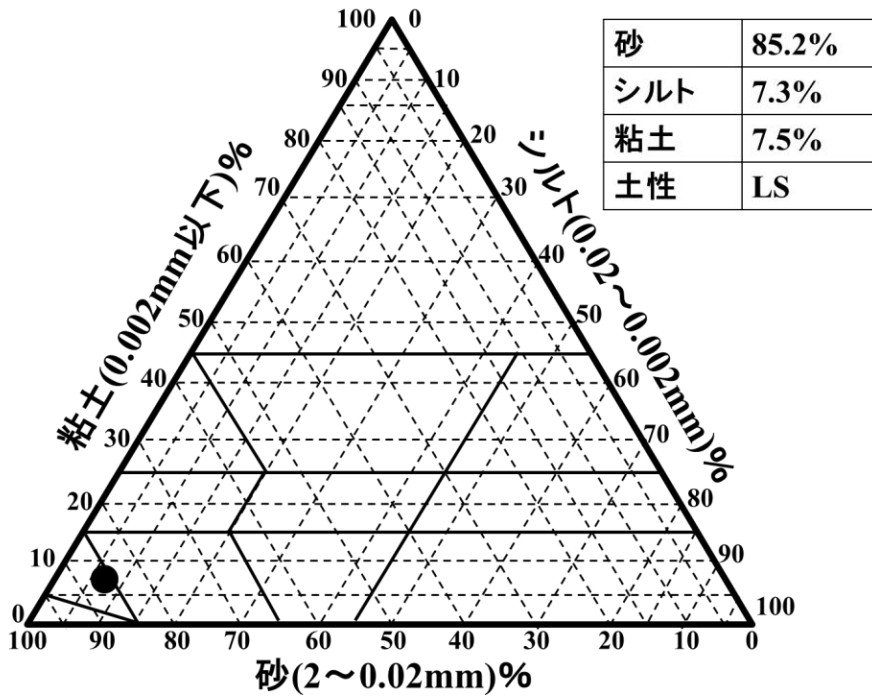


Fig. 4-15 土性(熊本III層)

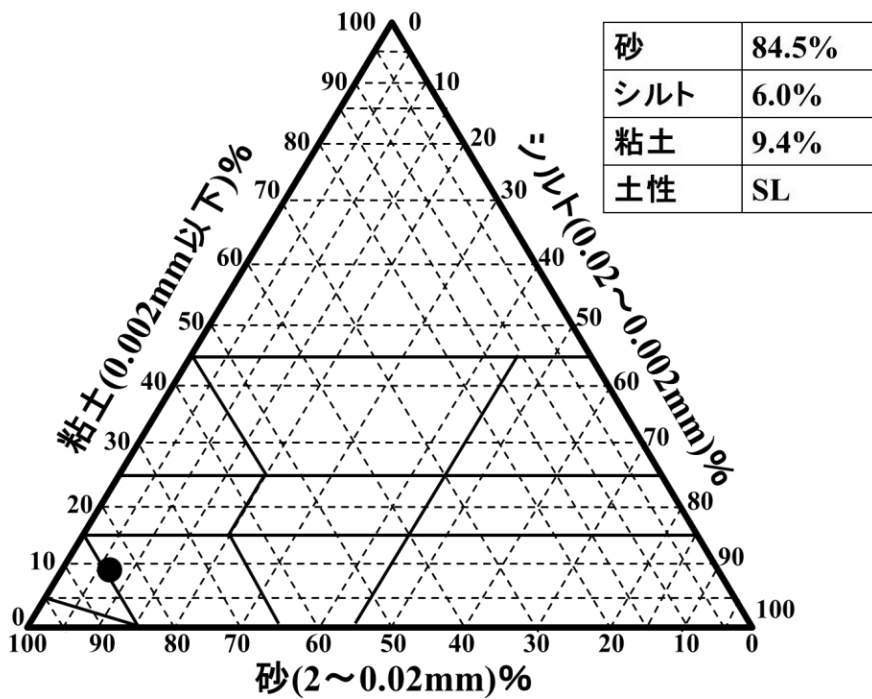


Fig. 4-16 土性(熊本IV層)

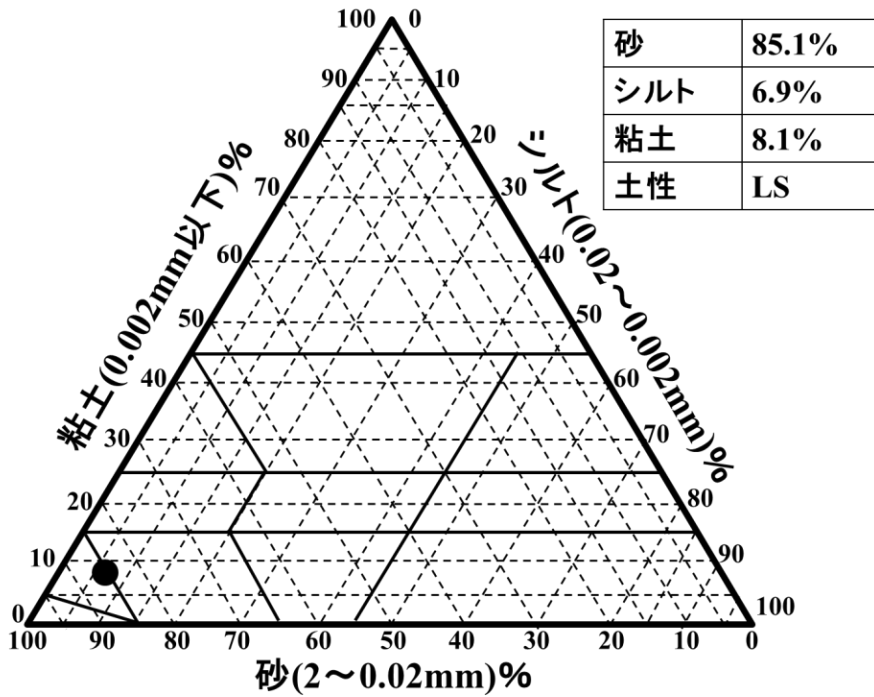


Fig. 4-17 土性(熊本V層)

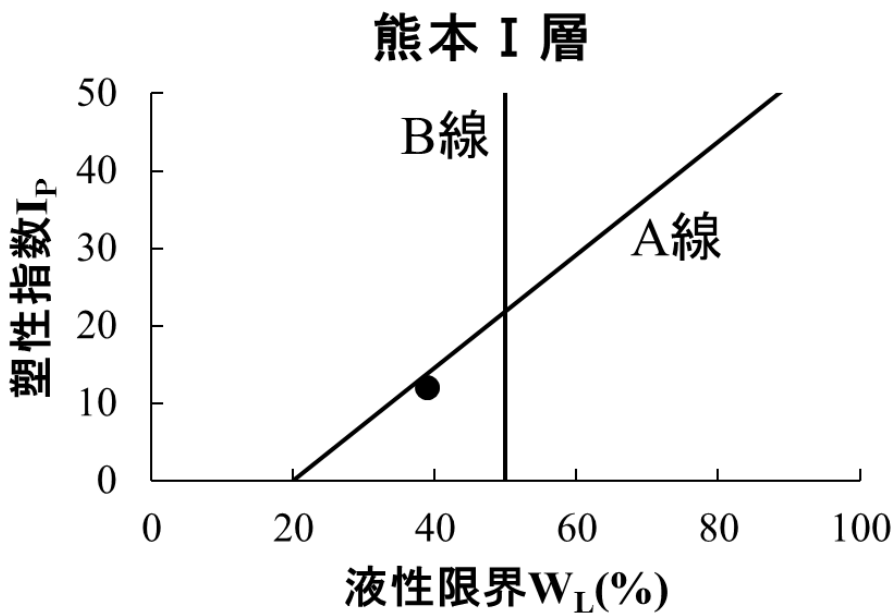


Fig. 4-18 塑性図(熊本 I 層)

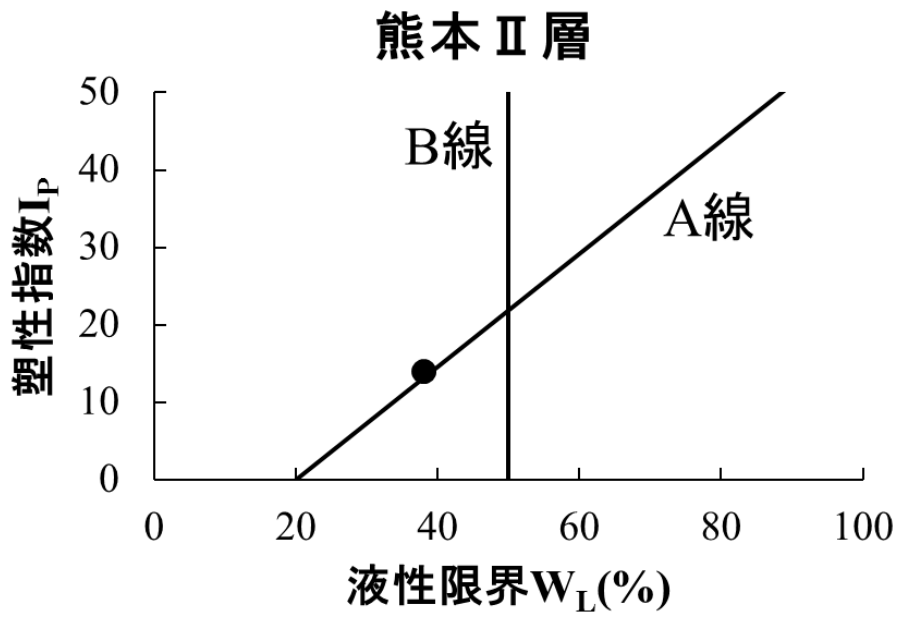


Fig. 4-19 塑性図(熊本Ⅱ層)

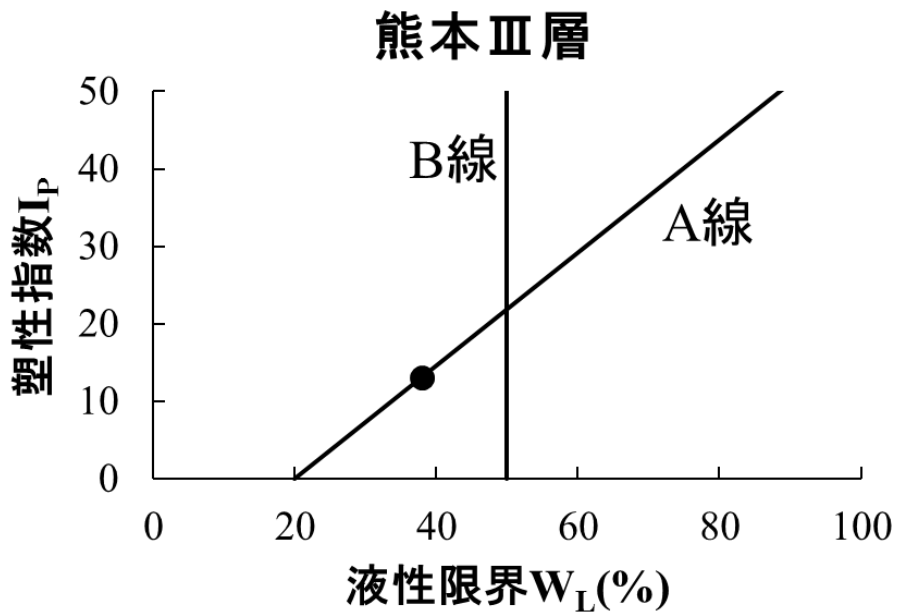


Fig. 4-20 塑性図(熊本Ⅲ層)

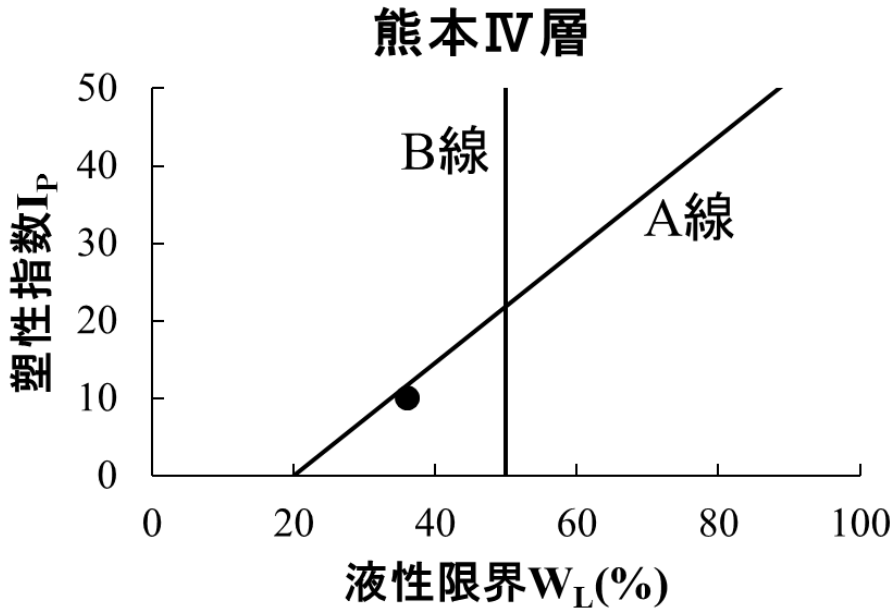


Fig. 4-21 塑性図(熊本IV層)

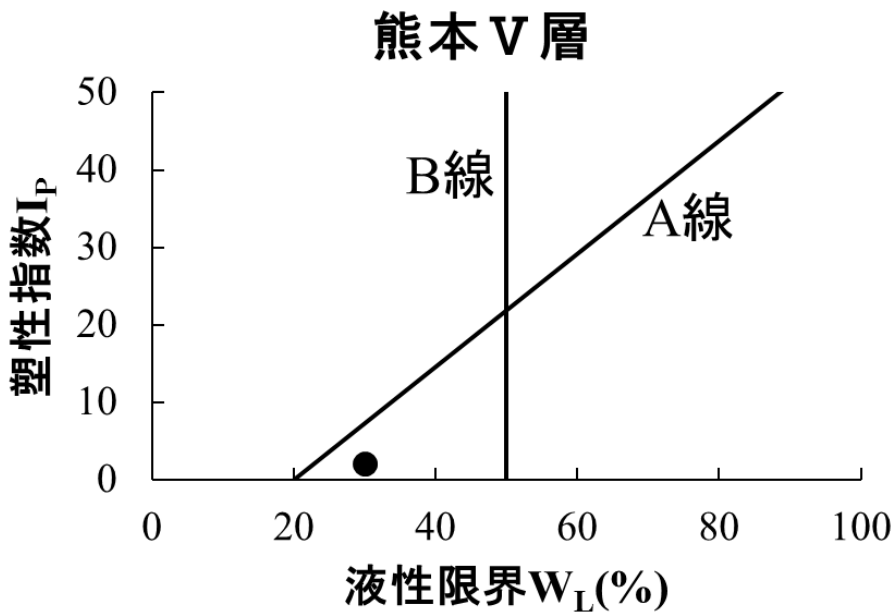


Fig. 4-22 塑性図(熊本V層)

4.2.2 透水係数

定水位透水試験による測定結果を，Table 4-3，Fig. 4-23 に示す。

I 層は鉛直，水平方向どちらとも難透水性を示しているが，水平方向の透水性は，II～V層まで一様で， $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 付近となった。鉛直方向については，耕盤層で一度水が通りにくくなるが，その後は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 付近となった。

異方性については，I 層およびIII層で大きくなった。つまり，鉛直方向よりも水平方向の透水性が高い結果を示した。

【Table 4-3 定水位透水試験結果】

【Fig. 4-23 透水係数の鉛直分布(定水位透水試験)】

Table 4-3 定水位透水試験結果

試料名	鉛直方向 ($m \cdot S^{-1}$)	水平方向 ($m \cdot S^{-1}$)	異方性 (K_H/K_V)	
熊本 I 層	8.8E-09	7.0E-08	7.95	
熊本 II 層	1.2E-05	1.6E-06	0.13	
熊本 III 層	6.3E-07	2.0E-06	3.17	※耕盤層
熊本 IV 層	1.1E-05	1.6E-06	0.15	
熊本 V 層	5.7E-06	8.4E-07	0.15	

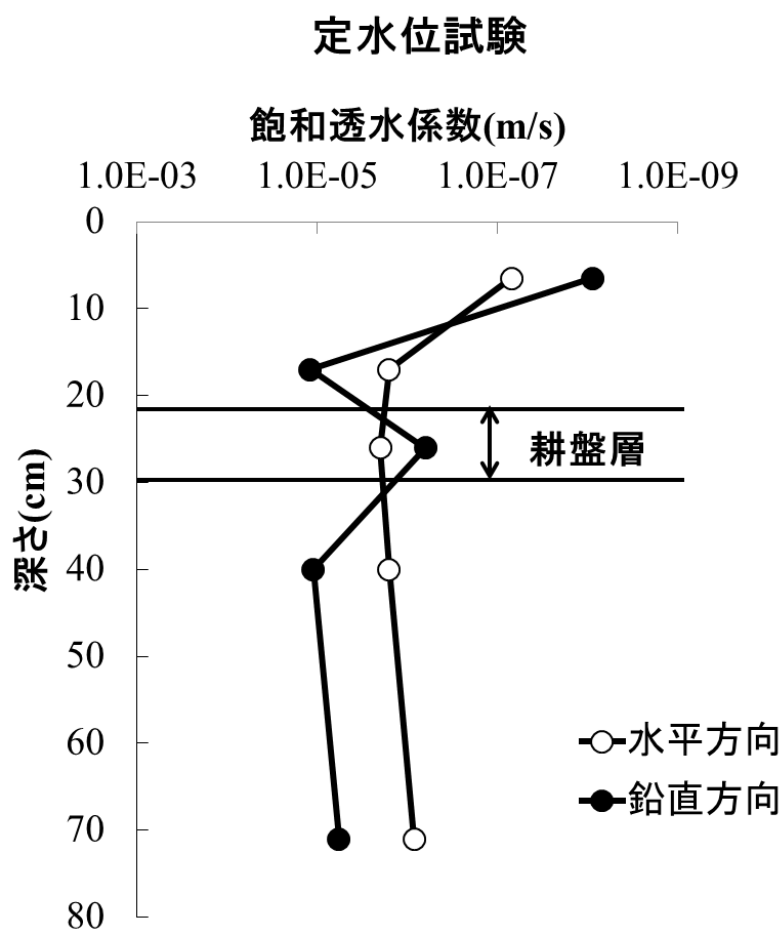


Fig. 4-23 透水係数の鉛直分布(定水位透水試験)

4.2.3 限界負圧

限界負圧測定の結果を Fig. 4-24～Fig. 4-32 に示す。また、各 Pk-脱水曲線の特徴を Fig. 1-5 のように分類した結果を Table 4-4 にまとめた。

Table 4-4 をみると、勾配の緩急性の特徴では、I 層水平方向、IV 層鉛直、IV 層水平方向は粗間隙に富んだ特徴を示し、その他の土層は微細な間隙が多い構造を示した。

また、曲線のたわみ性の特徴では、ほとんどが初期の脱水量が多く、IV 層鉛直のみが一様に脱水されたことがわかる。

そして、Fig. 1-4 のように、水平性の特徴をみると、I 層鉛直、III 層水平、V 層鉛直では開放直前のメニスカス張力が強い構造であった。

Fig. 1-6 より、各土層の開放前線後退の分類を行うと I 層水平、IV 層鉛直・水平の 3 試料が円錐型、その他は円筒型のタイプとなる。

つまり、I 層水平、IV 層の土層は、開放間隙量が上部から下部にかけて少なくなり、その他の土層は、一様に開放間隙が分布した土壌であった。

【Table 4-4 Pk-脱水曲線の分類】

【Fig. 4-24 限界負圧(熊本 I 層水平方向)】

【Fig. 4-25 限界負圧(熊本 I 層鉛直方向)】

【Fig. 4-26 限界負圧(熊本 II 層水平方向)】

【Fig. 4-27 限界負圧(熊本 II 層鉛直方向)】

【Fig. 4-28 限界負圧(熊本 III 層水平方向)】

【Fig. 4-29 限界負圧(熊本 III 層鉛直方向)】

【Fig. 4-30 限界負圧(熊本 IV 層水平方向)】

【Fig. 4-31 限界負圧(熊本 IV 層鉛直方向)】

【Fig. 4-32 限界負圧(熊本 V 層鉛直方向)】

Table 4-4 Pk-脱水曲線の分類

限界負圧パターン	試料
a	I 層水平, IV層水平
b	IV層鉛直
d	I 層鉛直, II 層水平, II 層鉛直, 三層水平, 三層鉛直, V 層鉛直

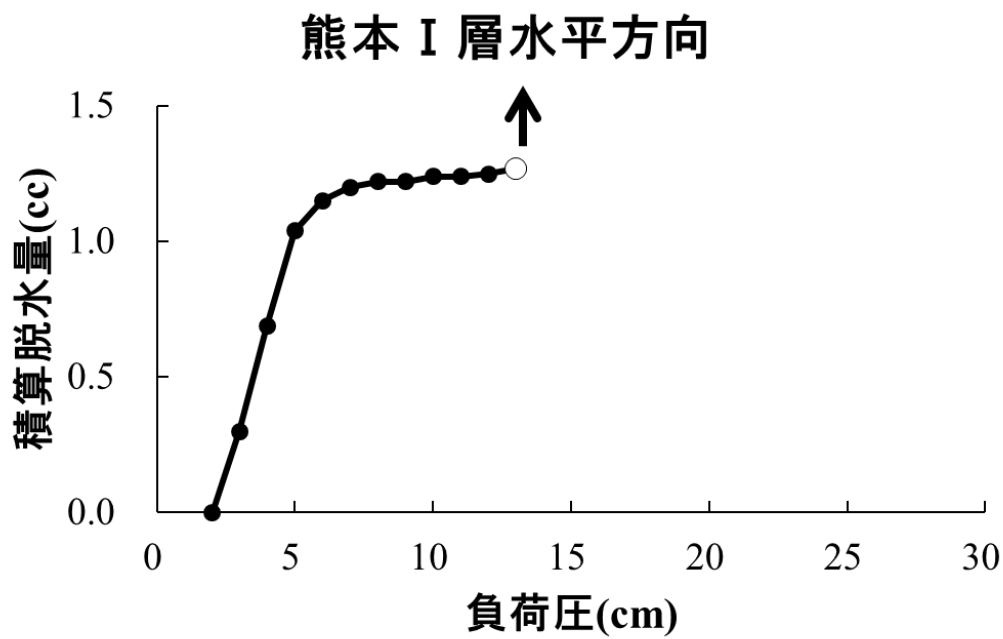


Fig. 4-24 限界負圧(熊本 I 層水平方向)

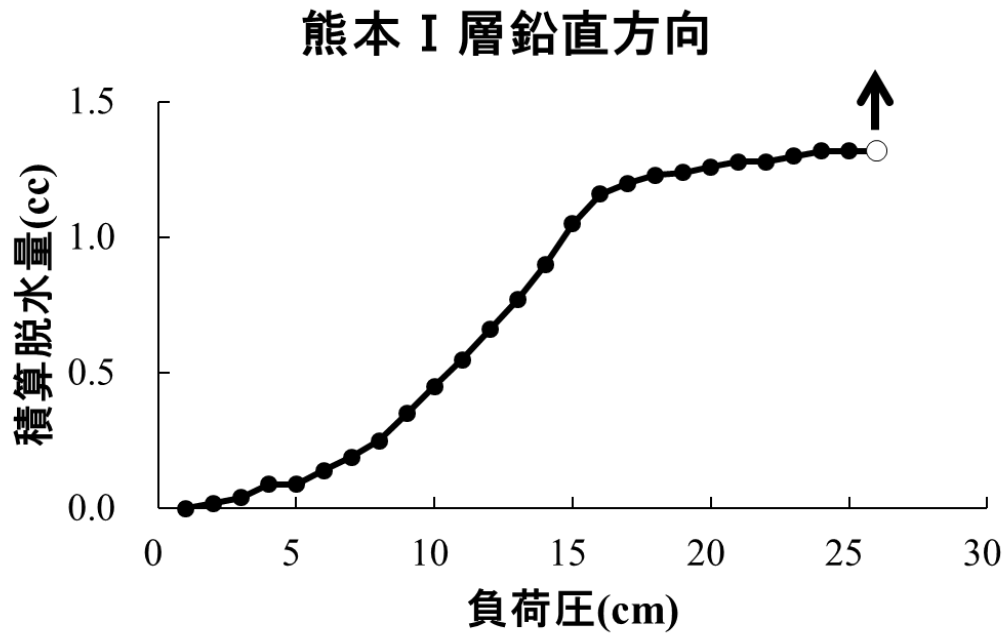


Fig. 4-25 限界負圧(熊本 I 層鉛直方向)

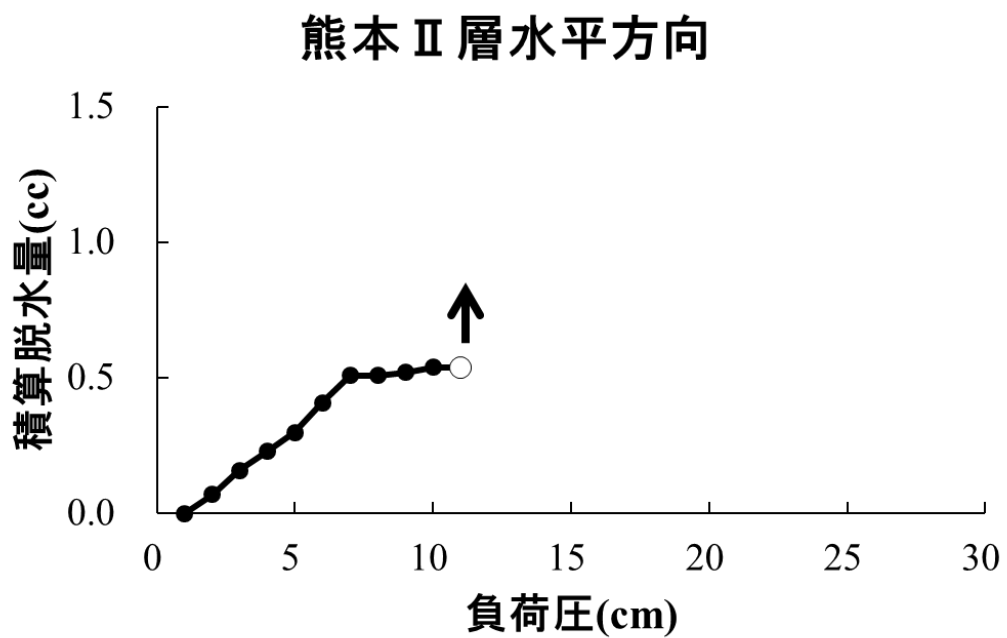


Fig. 4-26 限界負圧(熊本 II 層水平方向)

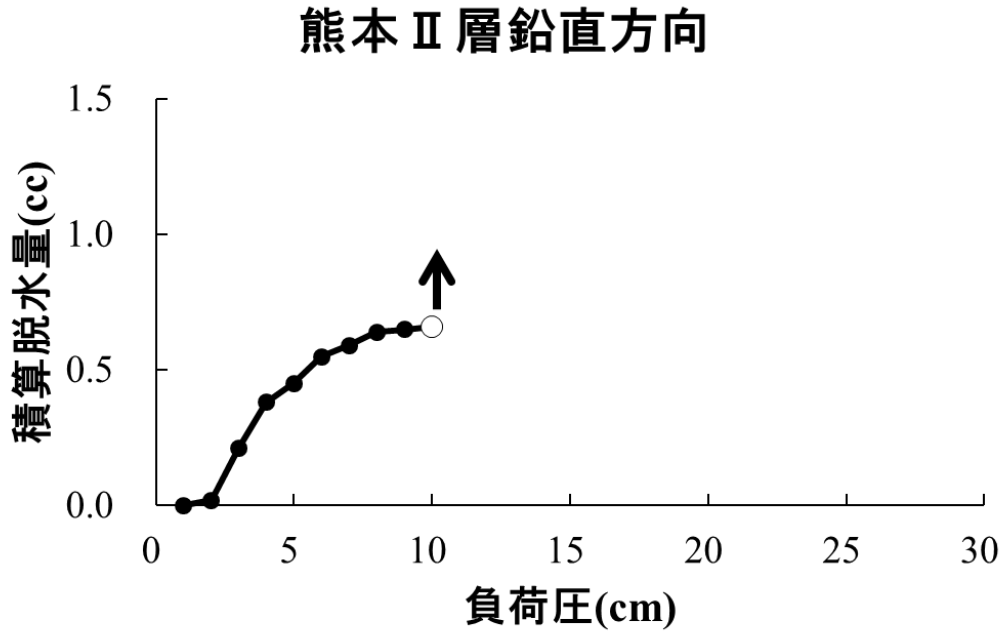


Fig. 4-27 限界負圧(熊本Ⅱ層鉛直方向)

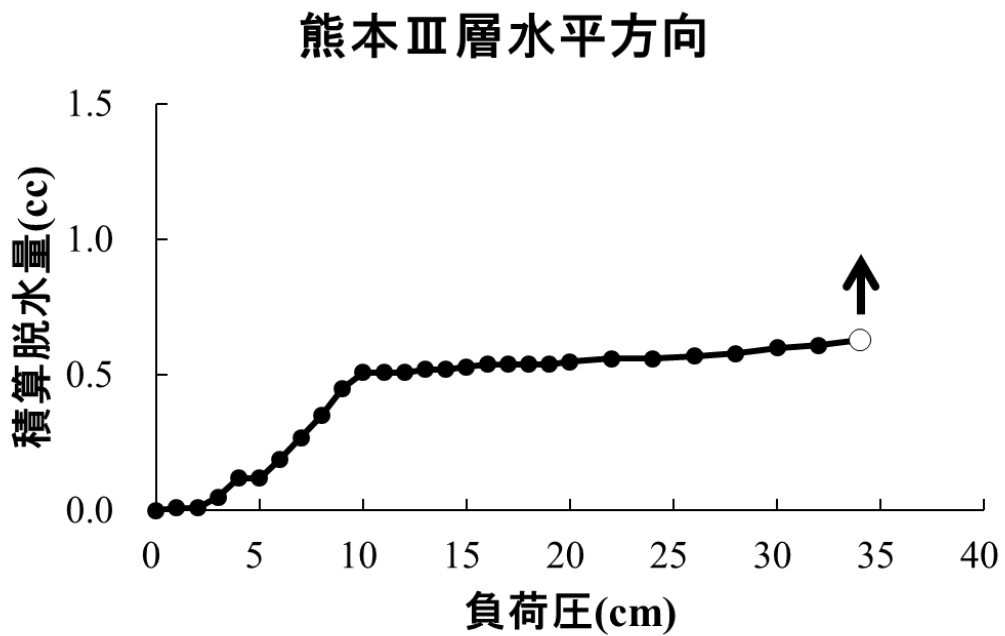


Fig. 4-28 限界負圧(熊本Ⅲ層水平方向)

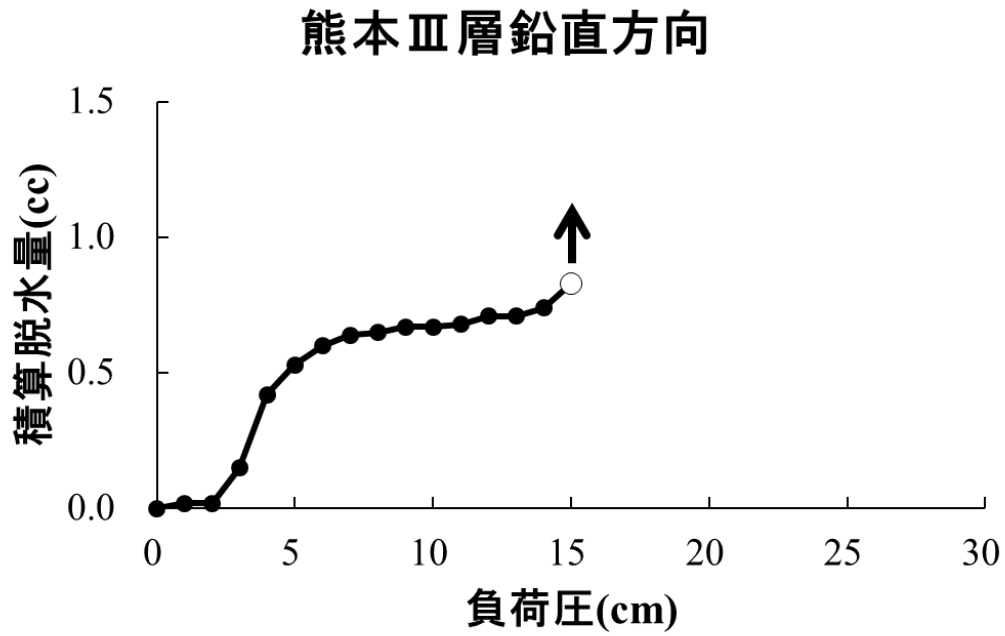


Fig. 4-29 限界負圧(熊本Ⅲ層鉛直方向)

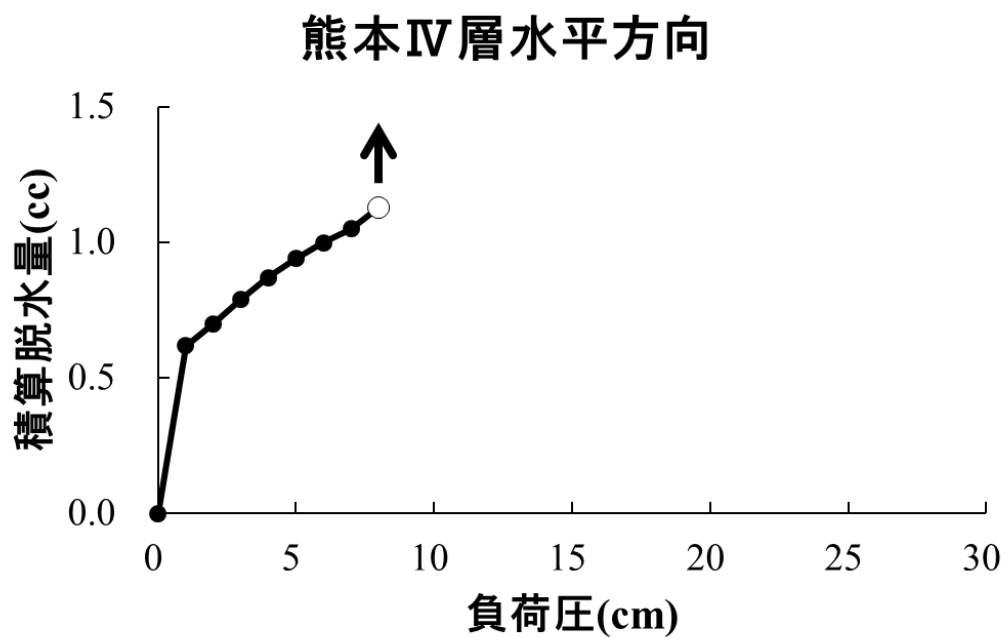


Fig. 4-30 限界負圧(熊本Ⅳ層水平方向)

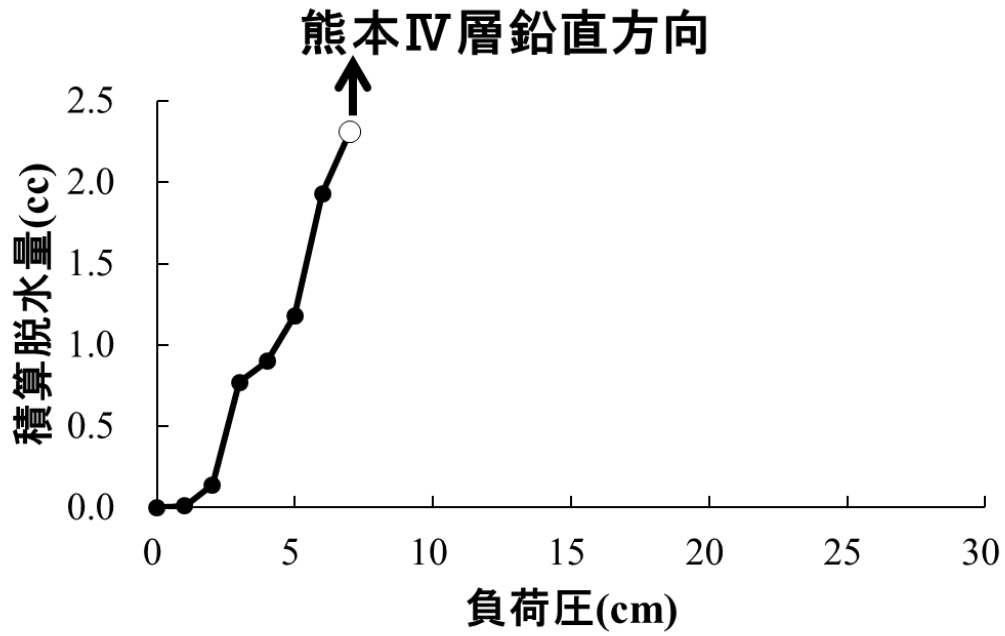


Fig. 4-31 限界負圧(熊本IV層鉛直方向)

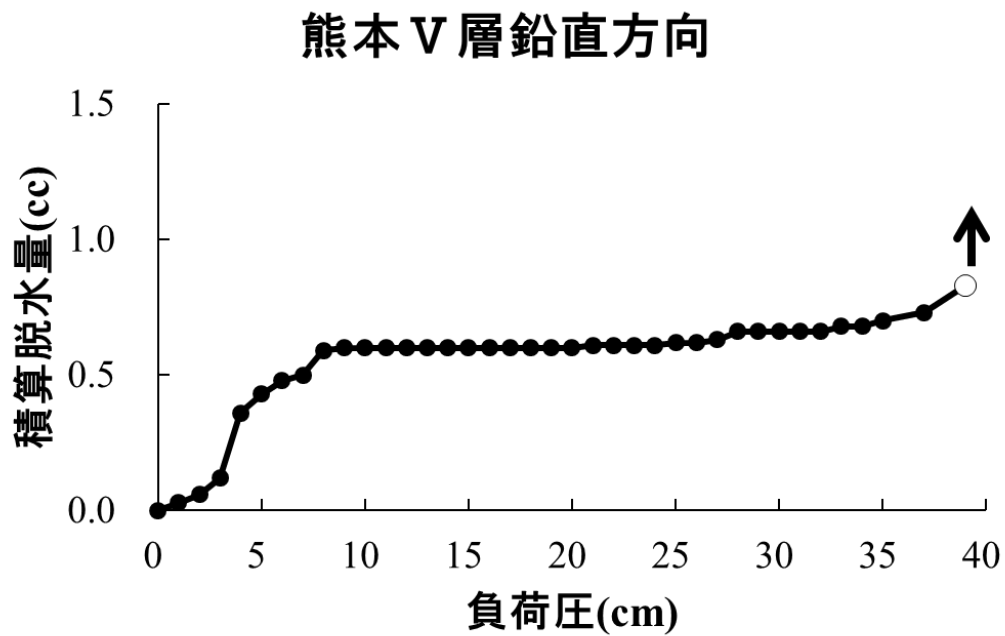


Fig. 4-32 限界負圧(熊本V層鉛直方向)

4.2.4 土壌水分特性

土壌水分特性試験の結果を Table 4-5 に示し、pF 水分分布曲線の特徴を Table 4-6 に示した。

pF- θ 曲線を Fig. 4-33~Fig. 4-42 に示す。また、pF 水分分布曲線を Fig. 4-43~Fig. 4-52 に各々示す。pF 水分分布曲線には、pF1.8 に相当する $d : 0.048(\text{mm})$ のところに点線を記入した。この pF1.8 を毛管水と非毛管水の境とした。

毛管水は毛管孔隙と呼ばれる細孔隙中に、毛管張力によって保持されている水で、毛管水の一部は土壌の孔隙内を様々な方向に緩やかに移動する。非毛管水とは、土壌の粗大孔隙中に保持される水で、重力の作用によって流出する。pF1.8 より大きい時は毛管である細間隙、pF1.8 より小さい時は非毛管である粗間隙となる。

(1) pF- θ 曲線

pF- θ 曲線(Fig. 4-33~Fig. 4-42)の傾向をみると、鉛直・水平方向の傾向に差異があったのは、Ⅲ層とⅤ層であった。Ⅲ層では、鉛直方向は高 pF 帯の脱水量が少なく、Ⅴ層では、鉛直方向は高 pF 帯での脱水量が増大した。

一方、Ⅰ層、Ⅱ層およびⅣ層では、鉛直・水平どちらとも類似した傾向であった。

(2) pF 水分分布曲線

pF 水分分布曲線の傾向は、Table 4-6 をみると、Ⅰ層とⅤ層は細間隙が、Ⅱ層は粗間隙が卓越し、Ⅲ・Ⅳ層は粗間隙、細間隙両方とも存在していることがわかった。

つまり、細間隙の多い表層と、心土層下部に、耕盤層付近が粗間隙分布によってつながっていた。

【Table 4-5 土壌水分特性試験結果】

【Table 4-6 pF 水分分布曲線の特徴】

【Fig. 4-33 pF- θ 曲線(熊本Ⅰ層水平方向)】

【Fig. 4-34 pF- θ 曲線(熊本Ⅰ層鉛直方向)】

【Fig. 4-35 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層水平方向)】

【Fig. 4-36 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層鉛直方向)】

【Fig. 4-37 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層水平方向)】

【Fig. 4-38 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層鉛直方向)】

【Fig. 4-39 pF- θ 曲線(熊本Ⅳ層水平方向)】

【Fig. 4-40 pF- θ 曲線(熊本Ⅳ層鉛直方向)】

【Fig. 4-41 pF- θ 曲線(熊本Ⅴ層水平方向)】

- 【Fig. 4-42 pF- θ 曲線(熊本V層鉛直方向)】
- 【Fig. 4-43 pF 水分分布曲線(熊本I層水平方向)】
- 【Fig. 4-44 pF 水分分布曲線(熊本I層鉛直方向)】
- 【Fig. 4-45 pF 水分分布曲線(熊本II層水平方向)】
- 【Fig. 4-46 pF 水分分布曲線(熊本II層鉛直方向)】
- 【Fig. 4-47 pF 水分分布曲線(熊本III層水平方向)】
- 【Fig. 4-48 pF 水分分布曲線(熊本III層鉛直方向)】
- 【Fig. 4-49 pF 水分分布曲線(熊本IV層水平方向)】
- 【Fig. 4-50 pF 水分分布曲線(熊本IV層鉛直方向)】
- 【Fig. 4-51 pF 水分分布曲線(熊本V層水平方向)】
- 【Fig. 4-52 pF 水分分布曲線(熊本V層鉛直方向)】

Table 4-5 土壤水分特性試験結果

試料名	pF								
	0	1.0	1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	2.7	3.0
熊本Ⅰ層水平	0.550	0.486	0.458	0.440	0.426	0.383	0.367	0.347	0.329
熊本Ⅰ層鉛直	0.581	0.488	0.458	0.443	0.433	0.400	0.381	0.354	0.335
熊本Ⅱ層水平	0.557	0.492	0.450	0.421	0.408	0.384	0.374	0.369	0.361
熊本Ⅱ層鉛直	0.554	0.485	0.439	0.404	0.390	0.358	0.351	0.349	0.340
熊本Ⅲ層水平	0.584	0.495	0.472	0.457	0.447	0.406	0.388	0.373	0.333
熊本Ⅲ層鉛直	0.554	0.488	0.478	0.472	0.468	0.447	0.444	0.427	0.427
熊本Ⅳ層水平	0.550	0.534	0.491	0.483	0.462	0.413	0.403	0.365	0.350
熊本Ⅳ層鉛直	0.568	0.536	0.486	0.472	0.461	0.431	0.414	0.397	0.374
熊本Ⅴ層水平	0.573	0.531	0.494	0.481	0.470	0.447	0.433	0.406	0.393
熊本Ⅴ層鉛直	0.564	0.537	0.494	0.473	0.442	0.389	0.355	0.322	0.290

体積含水率(g/cm³)

Table 4-6 pF 水分分布曲線の特徴

層番号	採土方向	特徴
Ⅰ層	鉛直 水平	細間隙が卓越
Ⅱ層	鉛直 水平	粗間隙が卓越
Ⅲ層	鉛直 水平	細間隙, 粗間隙は同量のピーク
Ⅳ層	鉛直 水平	細間隙が卓越 細間隙, 粗間隙は同量のピーク
Ⅴ層	鉛直 水平	間隙径0.01mmのピーク以外は同量 細間隙が卓越

熊本 I 層水平方向

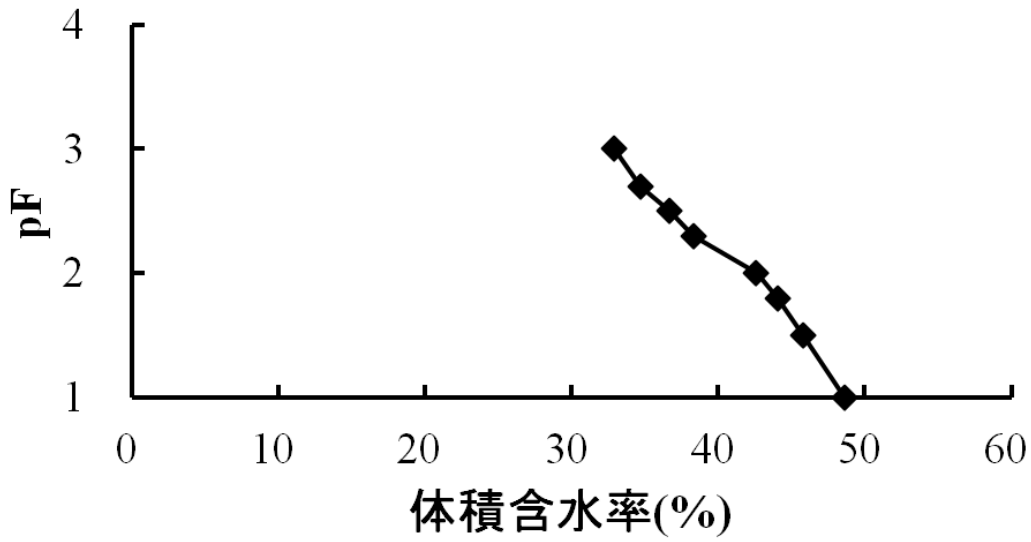


Fig. 4-33 pF- θ 曲線(熊本 I 層水平方向)

熊本 I 層鉛直方向

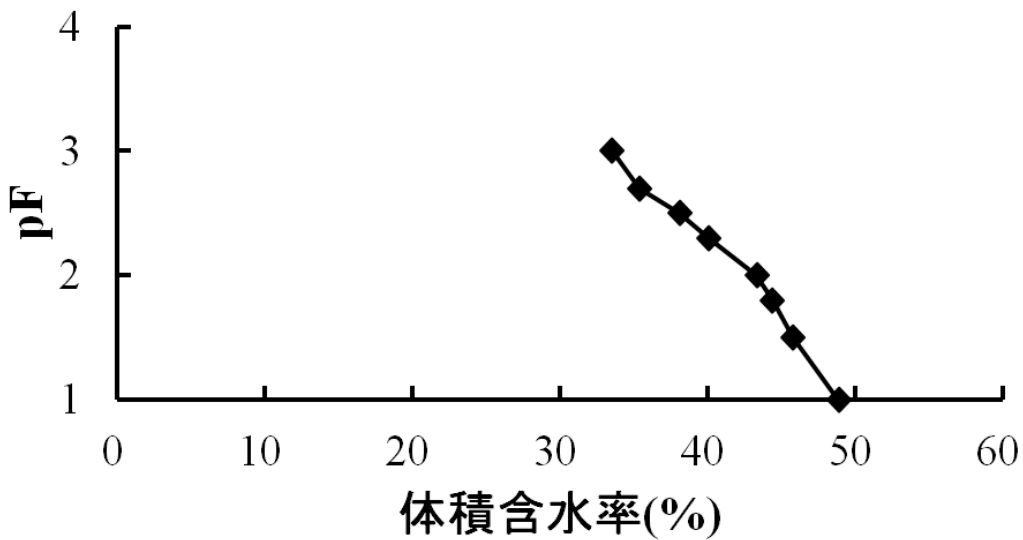


Fig. 4-34 pF- θ 曲線(熊本 I 層鉛直方向)

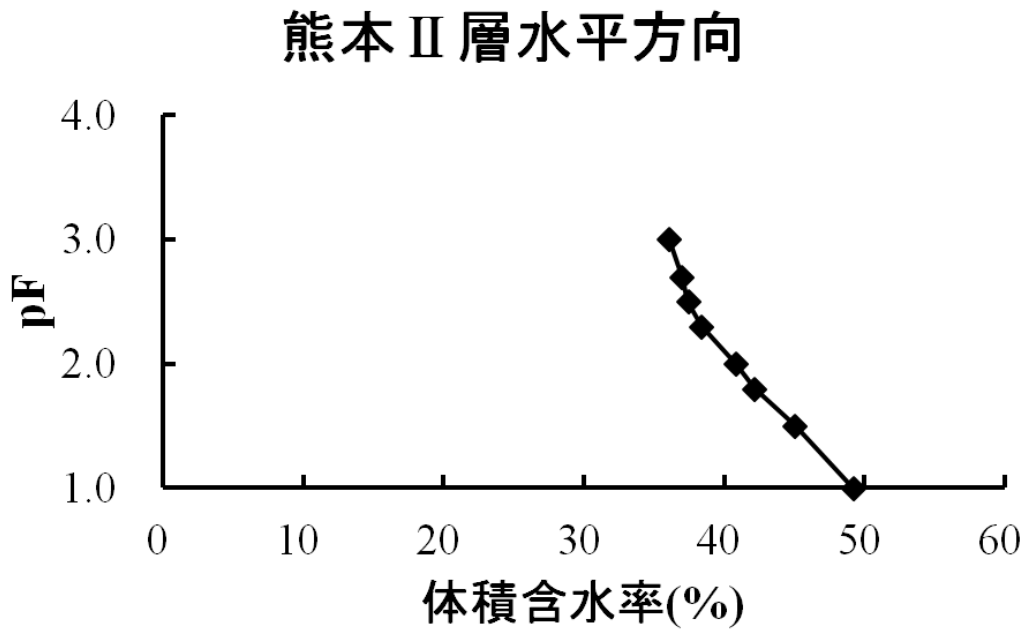


Fig. 4-35 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層水平方向)

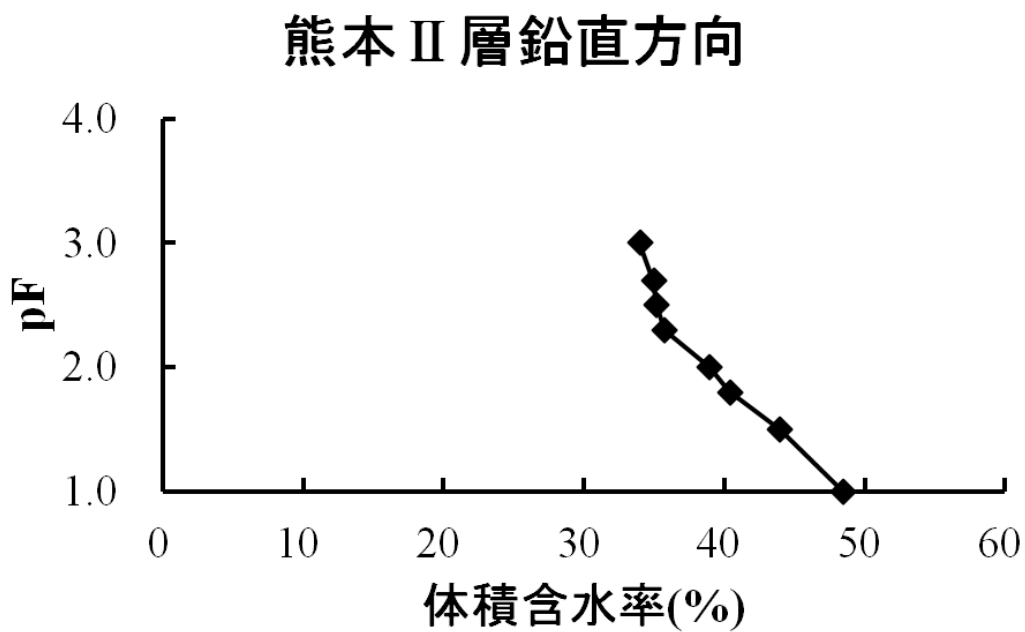


Fig. 4-36 pF- θ 曲線(熊本Ⅱ層鉛直方向)

熊本Ⅲ層水平方向

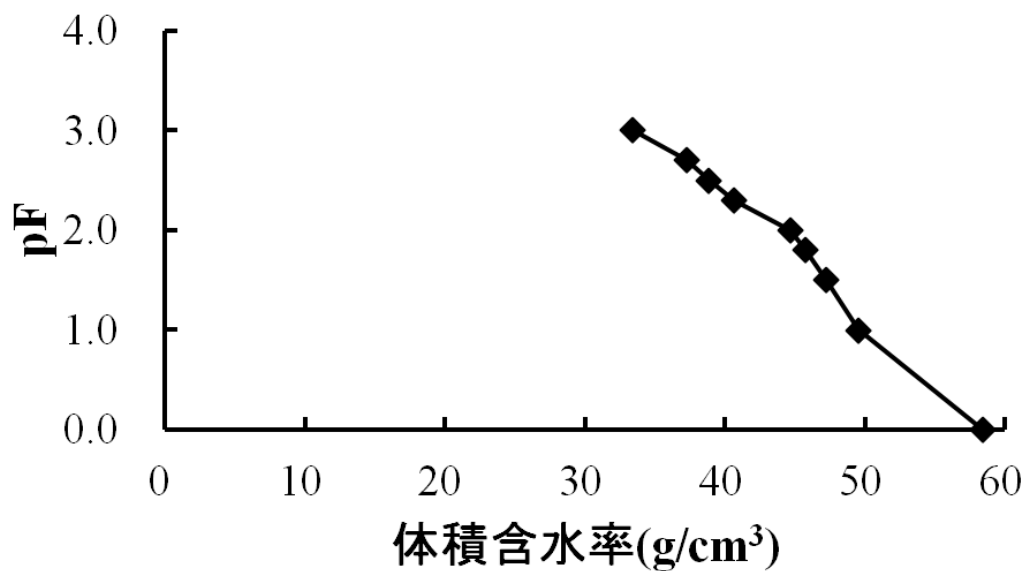


Fig. 4-37 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層水平方向)

熊本Ⅲ層鉛直方向

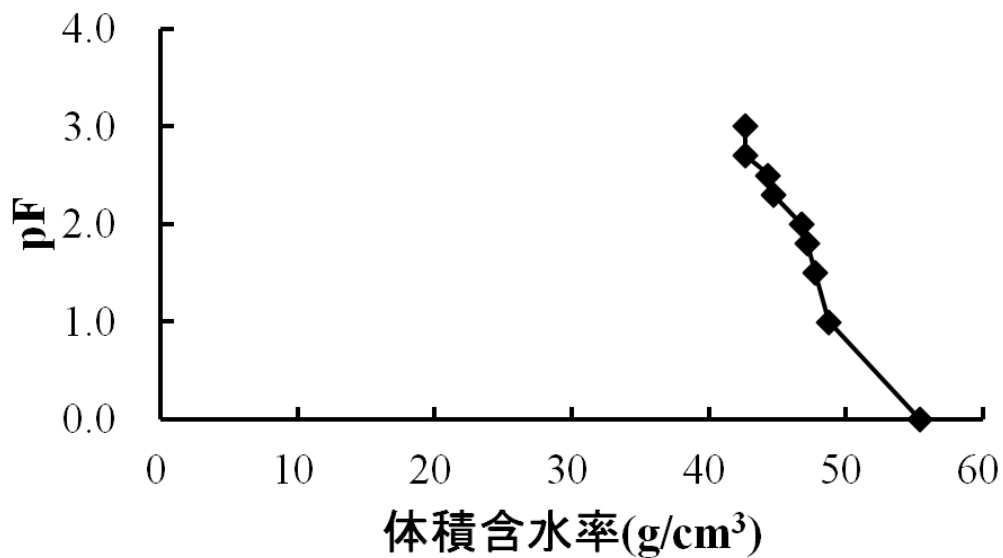


Fig. 4-38 pF- θ 曲線(熊本Ⅲ層鉛直方向)

熊本IV層水平方向

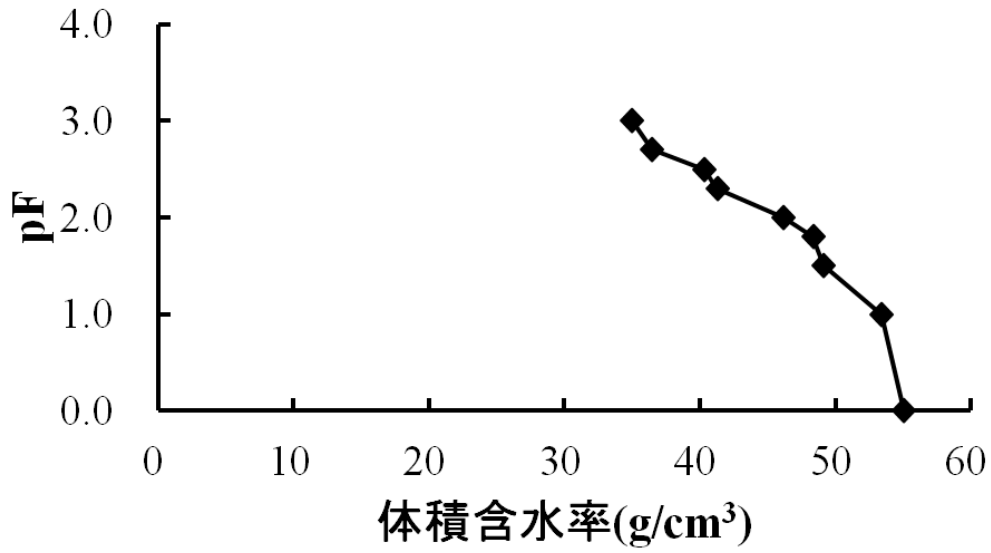


Fig. 4-39 pF- θ 曲線(熊本IV層水平方向)

熊本IV層鉛直方向

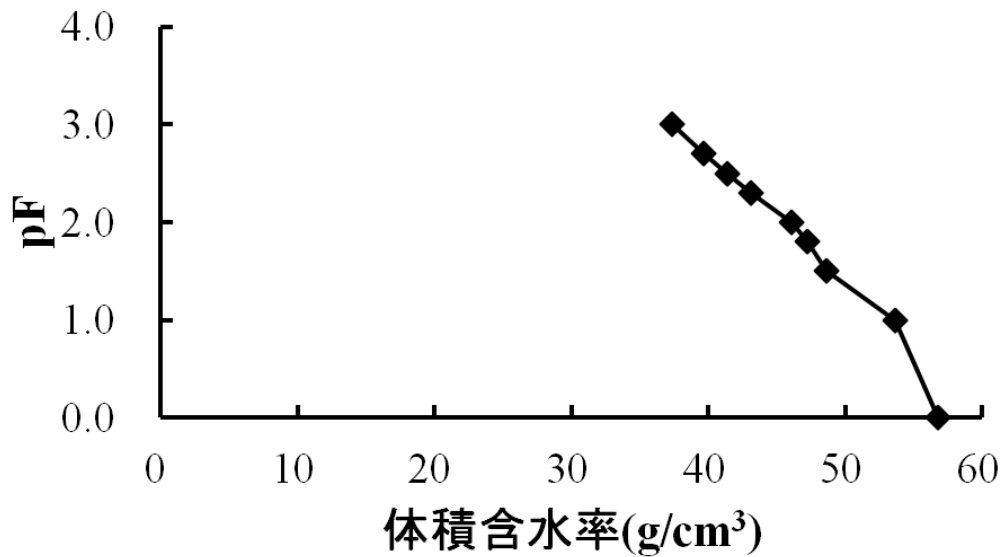


Fig. 4-40 pF- θ 曲線(熊本IV層鉛直方向)

熊本 V 層水平方向

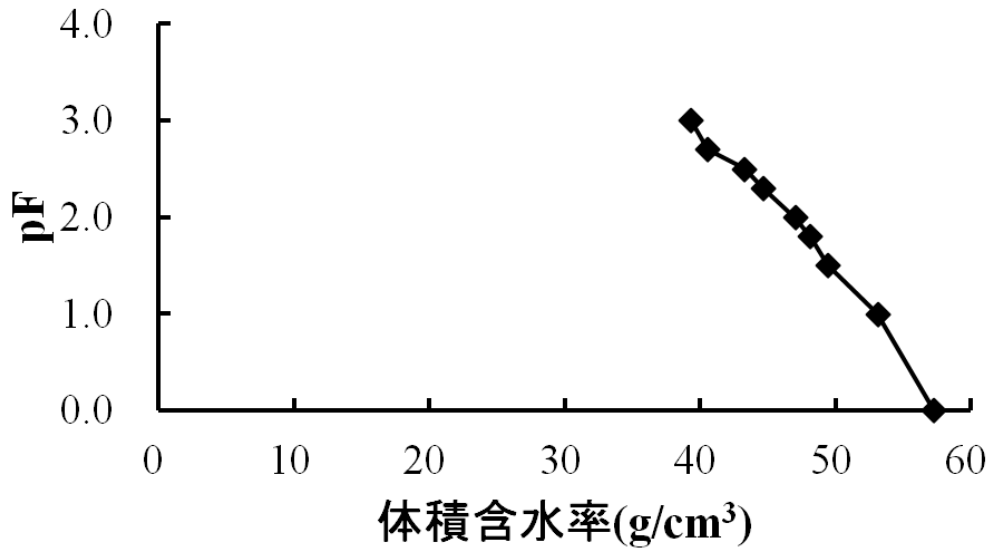


Fig. 4-41 pF- θ 曲線(熊本 V 層水平方向)

熊本 V 層鉛直方向

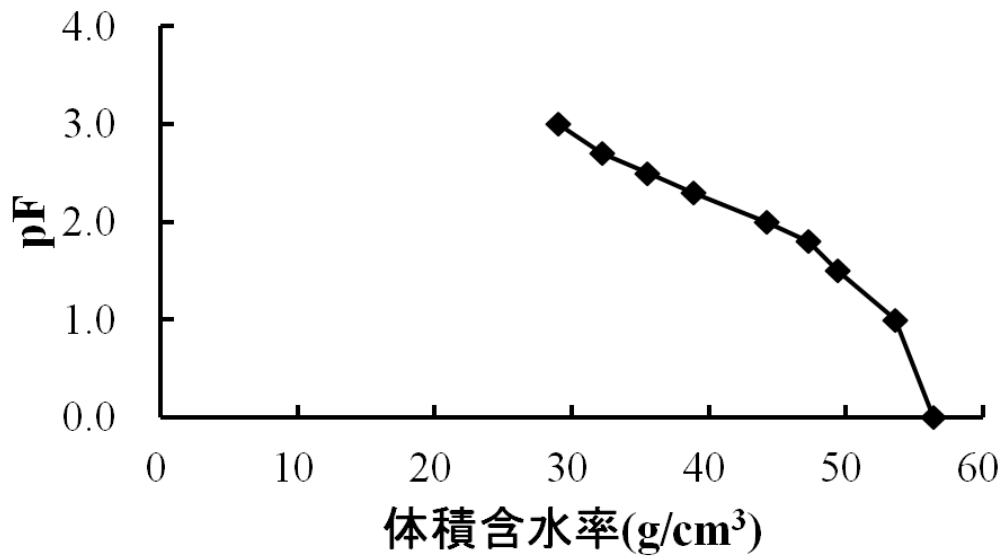


Fig. 4-42 pF- θ 曲線(熊本 V 層鉛直方向)

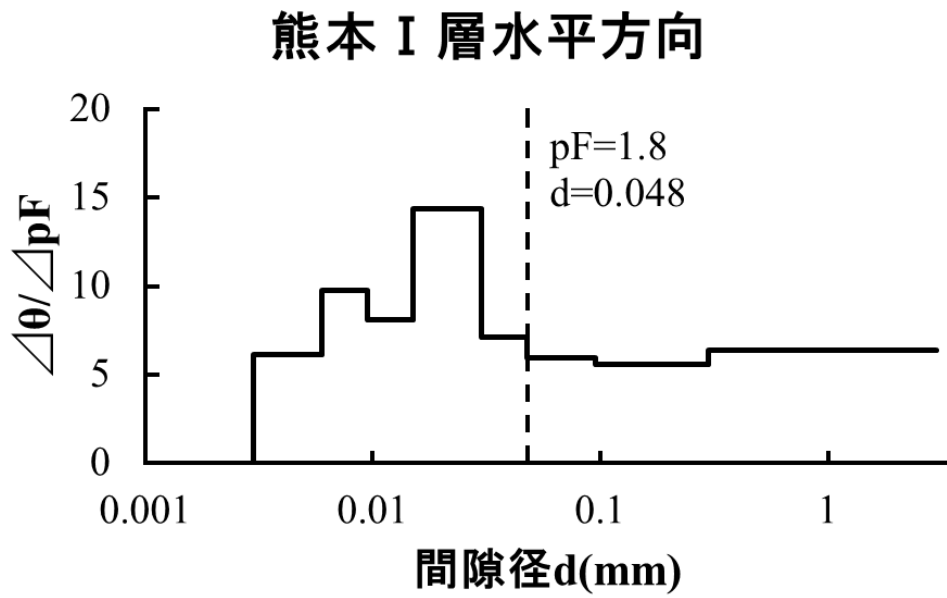


Fig. 4-43 pF 水分分布曲線(熊本 I 層水平方向)

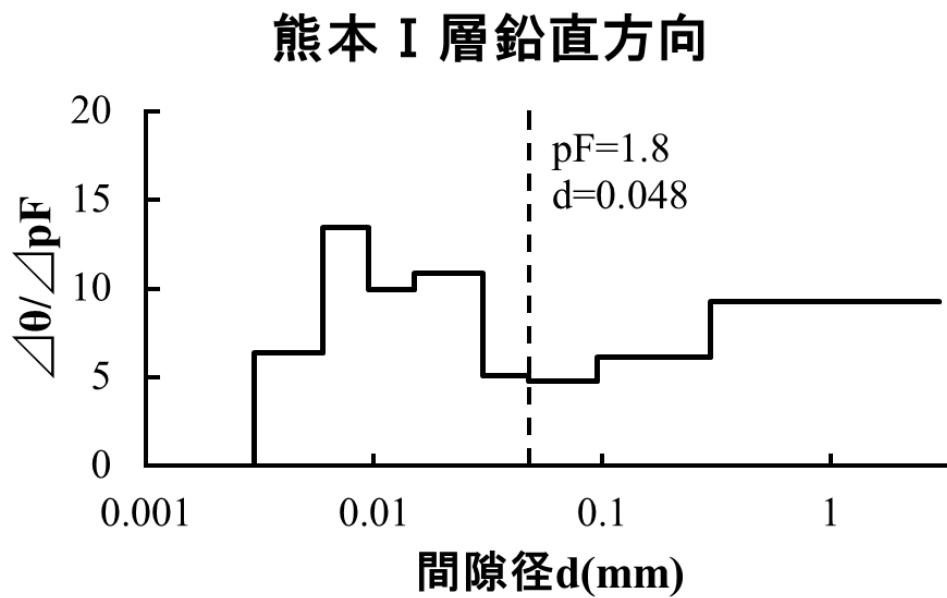


Fig. 4-44 pF 水分分布曲線(熊本 I 層鉛直方向)

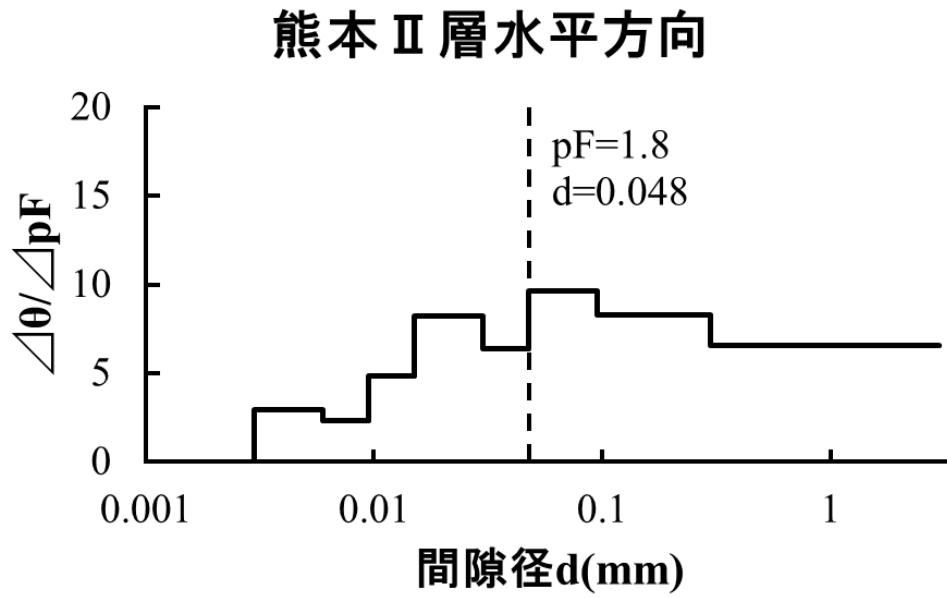


Fig. 4-45 pF 水分分布曲線(熊本Ⅱ層水平方向)

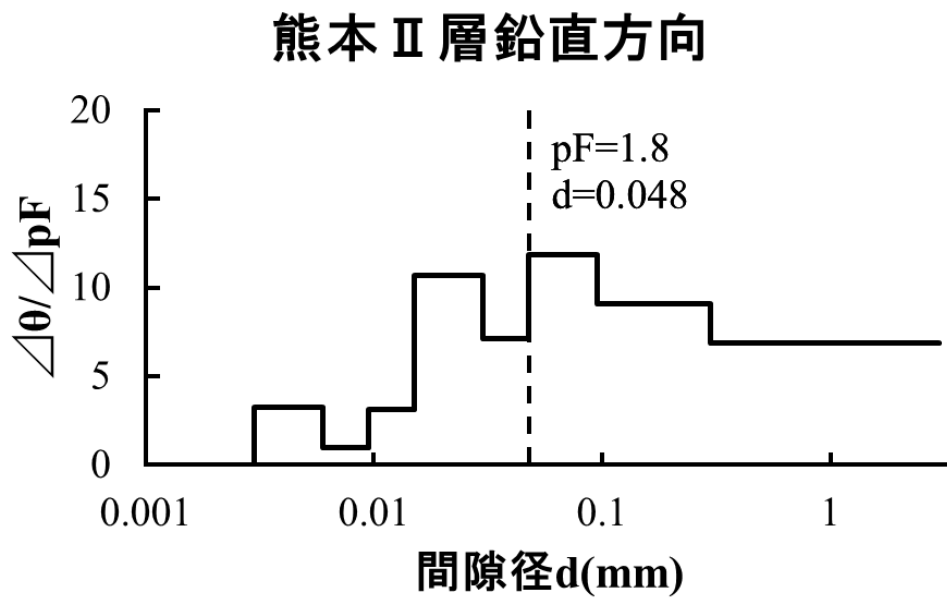


Fig. 4-46 pF 水分分布曲線(熊本Ⅱ層鉛直方向)

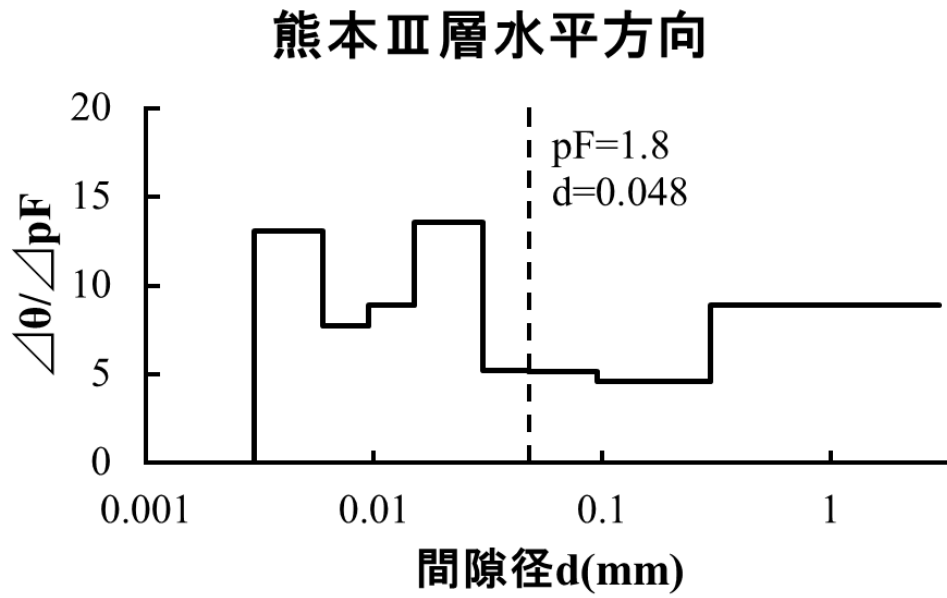


Fig. 4-47 pF 水分分布曲線(熊本Ⅲ層水平方向)

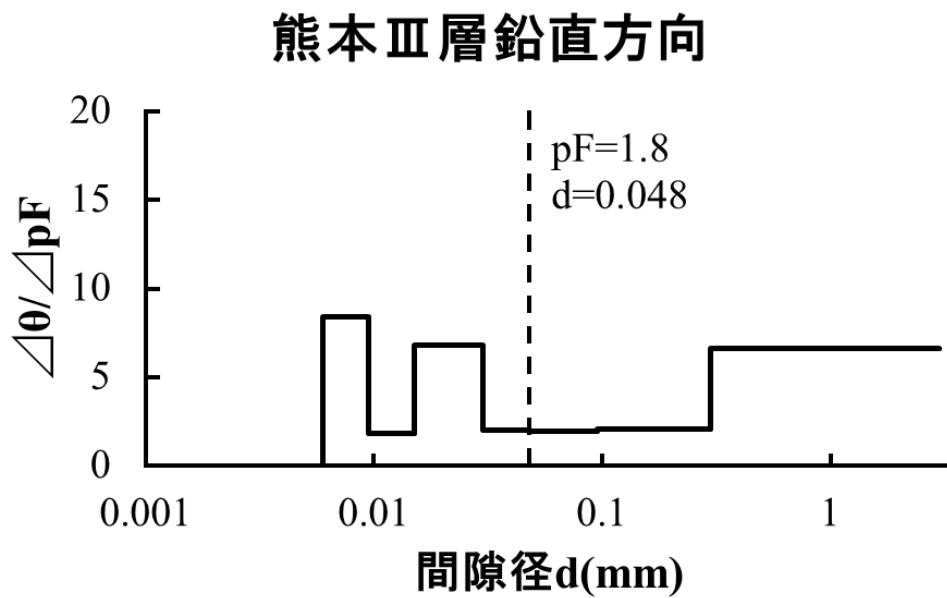


Fig. 4-48 pF 水分分布曲線(熊本Ⅲ層鉛直方向)

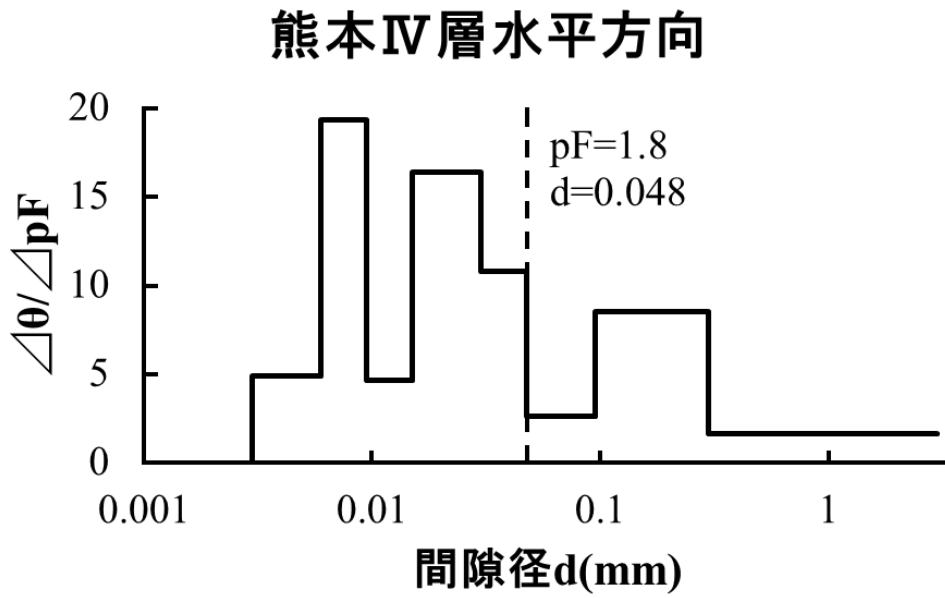


Fig. 4-49 pF 水分分布曲線(熊本IV層水平方向)

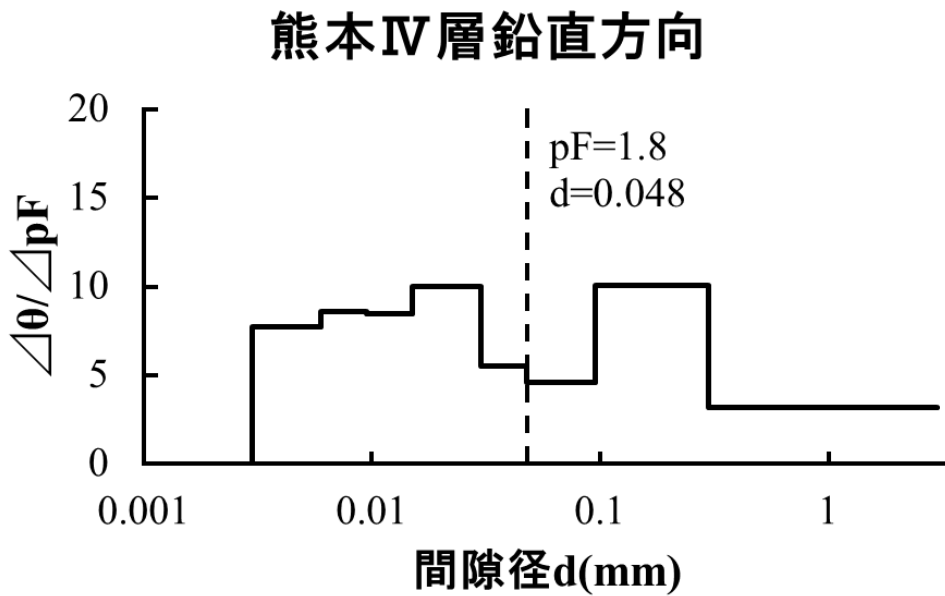


Fig. 4-50 pF 水分分布曲線(熊本IV層鉛直方向)

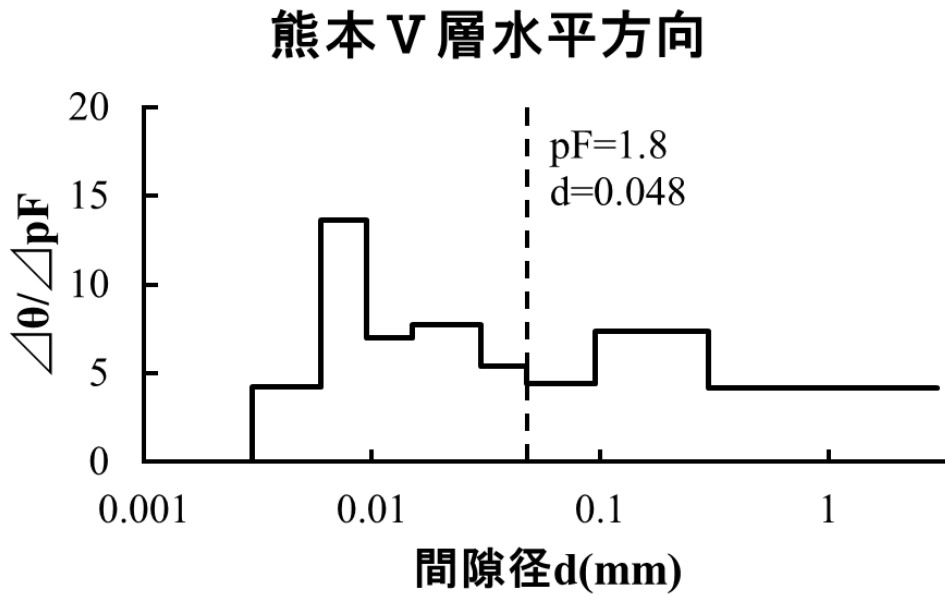


Fig. 4-51 pF 水分分布曲線(熊本V層水平方向)

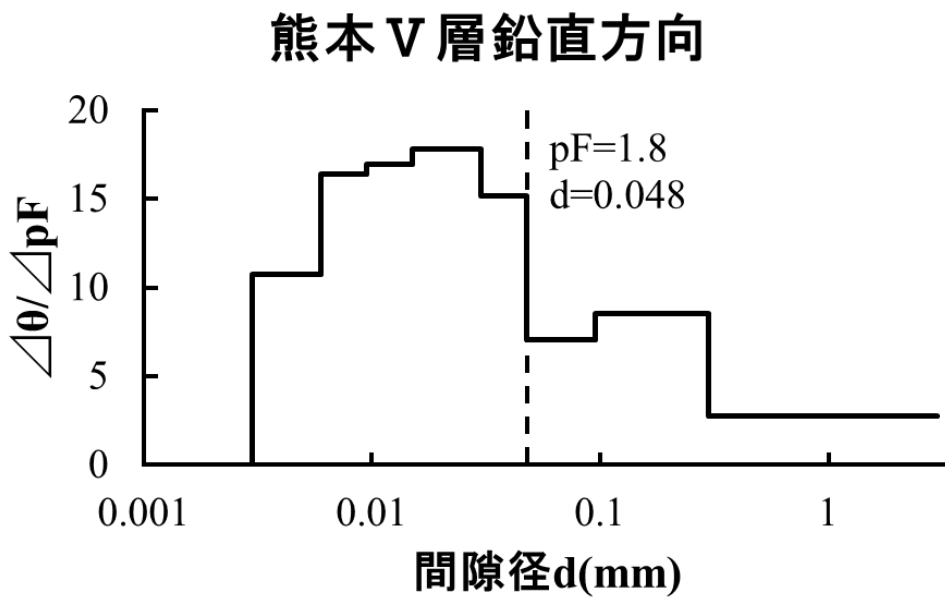


Fig. 4-52 pF 水分分布曲線(熊本V層鉛直方向)

4.2.5 軟 X 線撮影

フィルムによる不攪乱試料の軟 X 線撮影を行った。フィルム画像と、写真を比較した画像を Photo 4-7～Photo 4-25 に示す。また、軟 X 線から読み取れる試料の間隙特徴を Table 4-7 にまとめた。

Table 4-7 より、Ⅱ層以外は壁状の土層であり、締まった土壌環境であることがわかる。また、間隙の伸長方向に特徴があり、Ⅱ層、Ⅳ層では鉛直・水平方向に管状孔隙が一様に分布している。特にⅡ層は管状孔隙の卓越が顕著である。

Ⅲ層については、鉛直方向では点状の孔隙が、水平方向では線状の孔隙がみられた。つまり、Ⅲ層では鉛直方向に伸長する管状孔隙が卓越していることがわかる。

【Table 4-7 軟 X 線画像での粗間隙特徴】

【Photo 4-7 熊本Ⅰ層水平方向の軟 X 線画像(K1：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-8 熊本Ⅰ層水平方向の軟 X 線画像(K2：限界負圧)】

【Photo 4-9 熊本Ⅰ層鉛直方向の軟 X 線画像(K3：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-10 熊本Ⅰ層鉛直方向の軟 X 線画像(K4：限界負圧)】

【Photo 4-11 熊本Ⅱ層水平方向の軟 X 線画像(K6：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-12 熊本Ⅱ層水平方向の軟 X 線画像(K7：限界負圧)】

【Photo 4-13 熊本Ⅱ層鉛直方向の軟 X 線画像(K8：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-14 熊本Ⅱ層鉛直方向の軟 X 線画像(K9：限界負圧)】

【Photo 4-15 熊本Ⅲ層水平方向の軟 X 線画像(K11：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-16 熊本Ⅲ層水平方向の軟 X 線画像(K12：限界負圧)】

【Photo 4-17 熊本Ⅲ層鉛直方向の軟 X 線画像(K13：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-18 熊本Ⅲ層鉛直方向の軟 X 線画像(K14：限界負圧)】

【Photo 4-19 熊本Ⅳ層水平方向の軟 X 線画像(K16：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-20 熊本Ⅳ層水平方向の軟 X 線画像(K17：限界負圧)】

【Photo 4-21 熊本Ⅳ層鉛直方向の軟 X 線画像(K18：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-22 熊本Ⅳ層鉛直方向の軟 X 線画像(K19：限界負圧)】

【Photo 4-23 熊本Ⅴ層水平方向の軟 X 線画像(K21：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-24 熊本Ⅴ層鉛直方向の軟 X 線画像(K23：透水試験，土壤水分特性試験)】

【Photo 4-25 熊本Ⅴ層鉛直方向の軟 X 線画像(K24：限界負圧)】

Table 4-7 軟 X 線画像での粗間隙特徴

土層	採土方向	特徴
I 層	鉛直	土壌は壁状, 粗間隙形成無し
	水平	土壌は壁状, 粗間隙形成有り
II 層	鉛直	管状孔隙が卓越
	水平	粗間隙形成に富む
III 層	鉛直	土壌は壁状, 管状孔隙に富む(点状)
	水平	土壌は壁状, 管状孔隙に富む(線状)
IV 層	鉛直	土壌は壁状, 管状孔隙に富む(点状, 線状)
	水平	
V 層	鉛直	土壌は壁状, 管状孔隙有り(点状, 線状)
	水平	

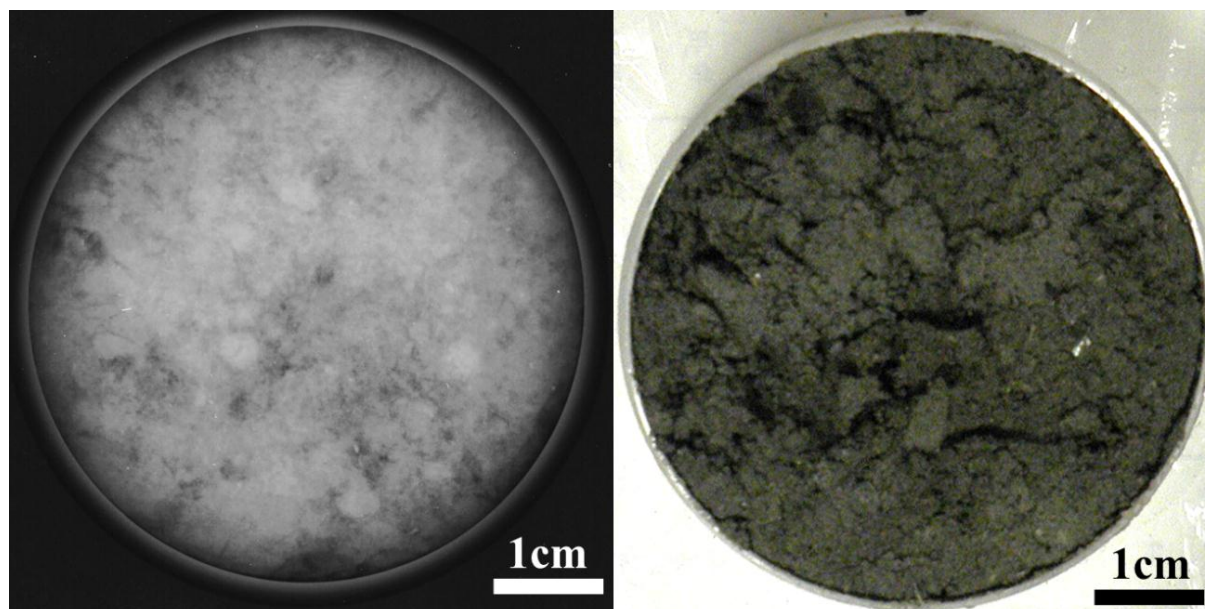


Photo 4-7 熊本 I 層水平方向の軟 X 線画像(K1 : 透水試験, 土壌水分特性試験)

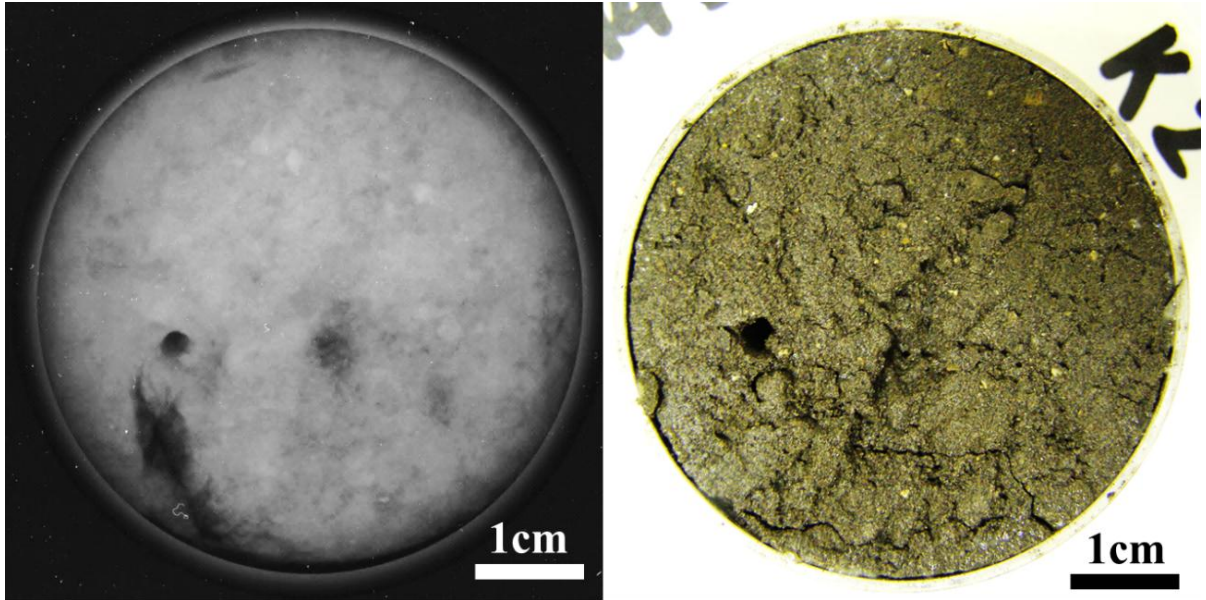


Photo 4-8 熊本 I 層水平方向の軟 X 線画像(K2 : 限界負圧)

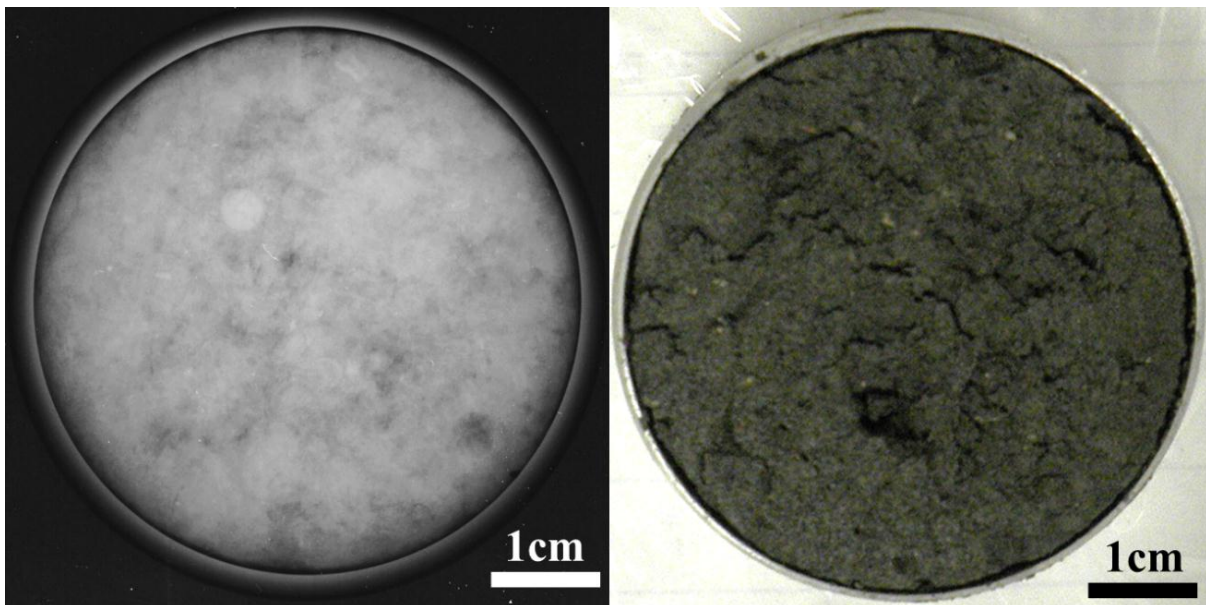


Photo 4-9 熊本 I 層鉛直方向の軟 X 線画像(K3 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

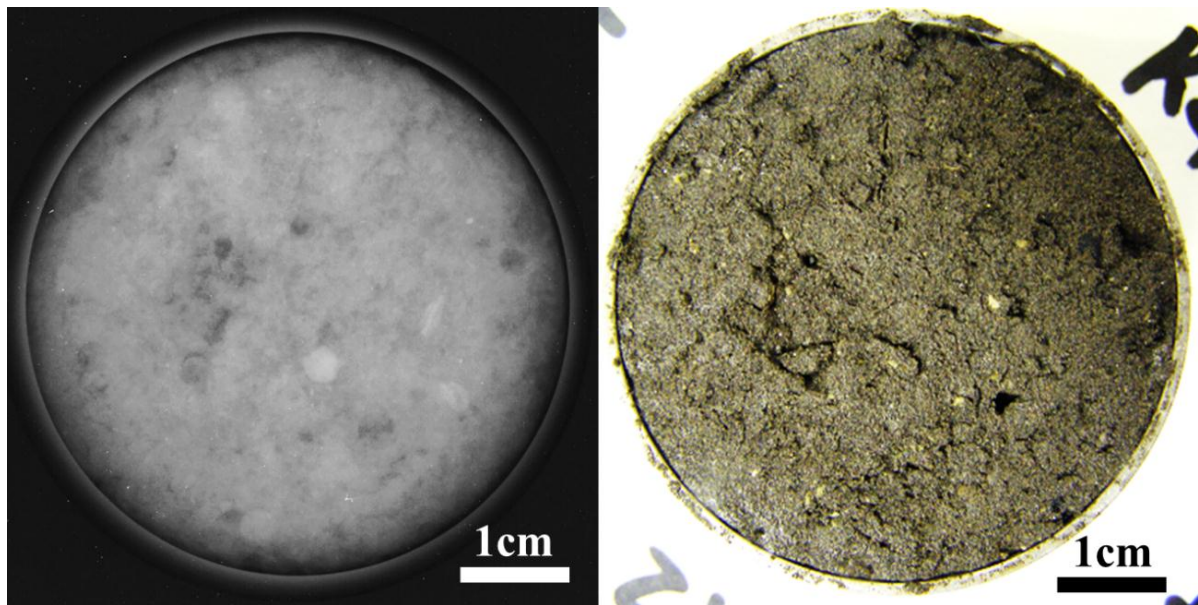


Photo 4-10 熊本 I 層鉛直方向の軟 X 線画像(K4 : 限界負圧)

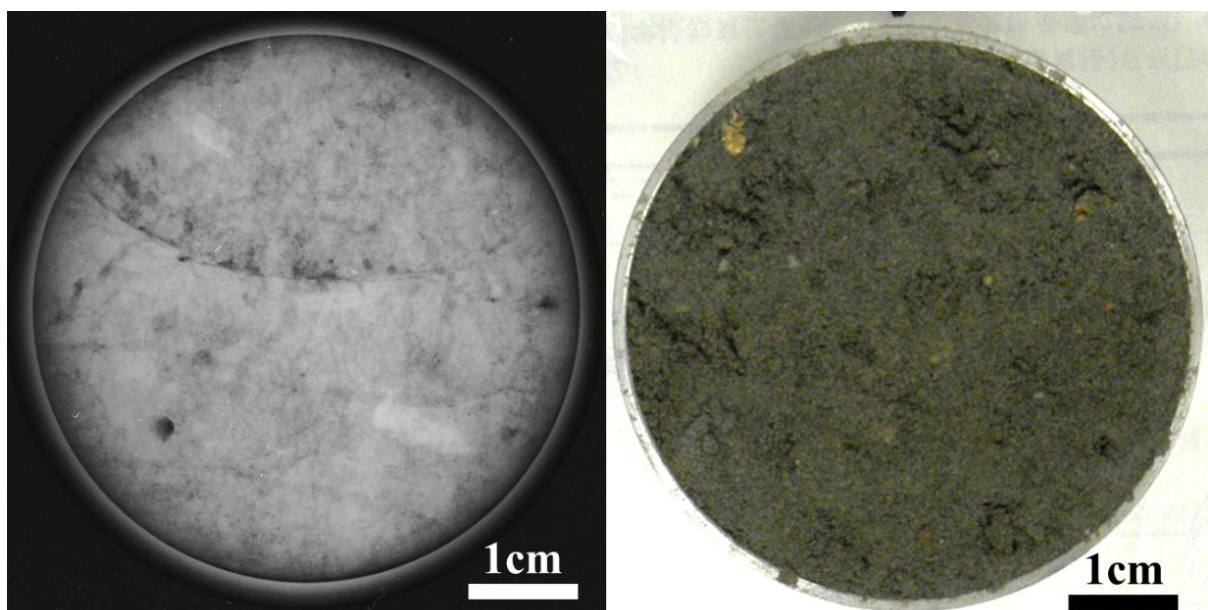


Photo 4-11 熊本 II 層水平方向の軟 X 線画像(K6 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

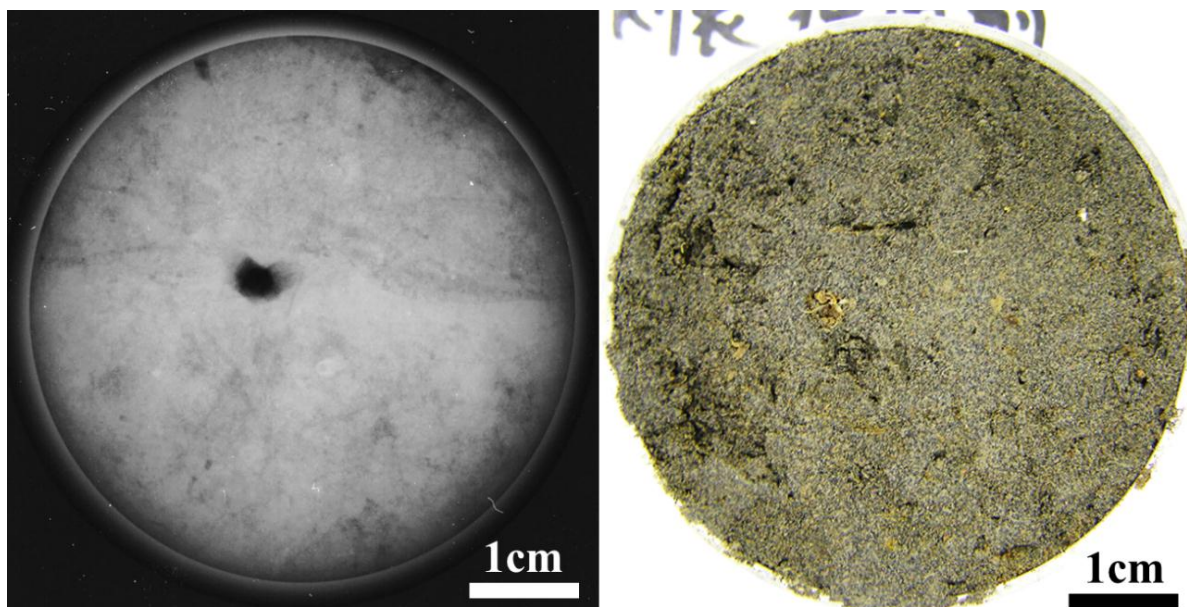


Photo 4-12 熊本Ⅱ層水平方向の軟 X 線画像(K7：限界負圧)

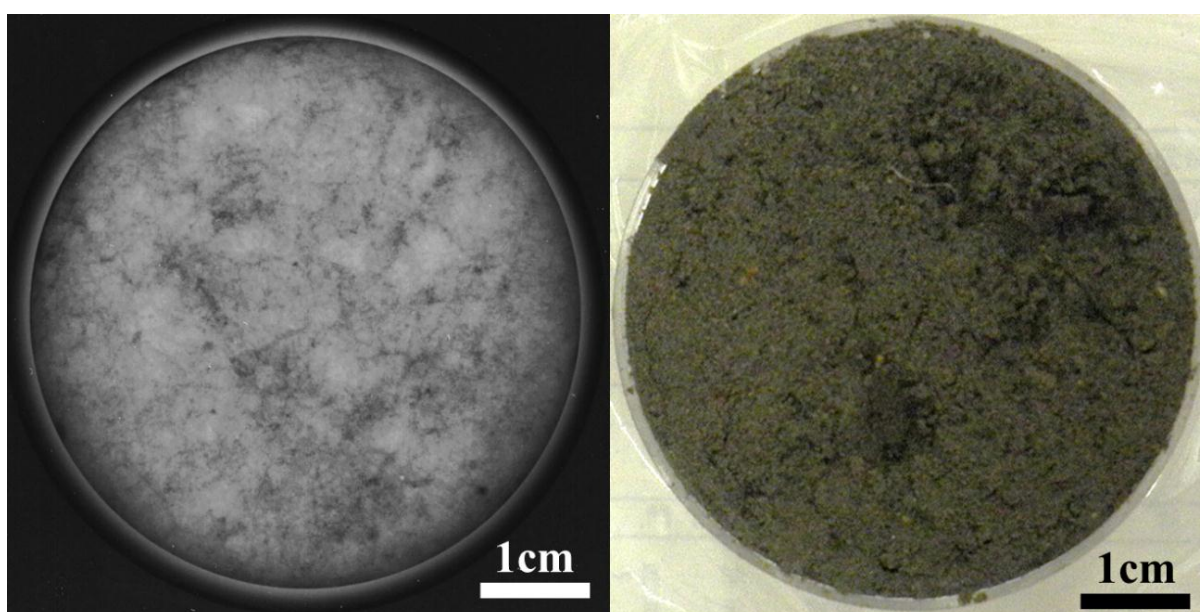


Photo 4-13 熊本Ⅱ層鉛直方向の軟 X 線画像(K8：透水試験，土壤水分特性試験)

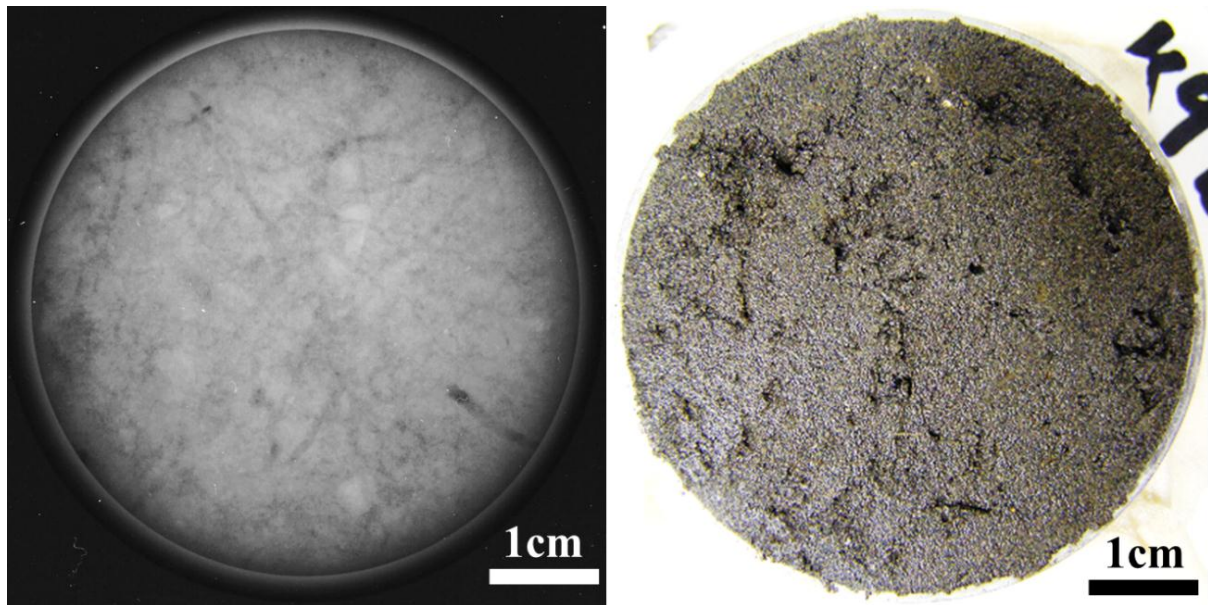


Photo 4-14 熊本Ⅱ層鉛直方向の軟 X 線画像(K9：限界負圧)

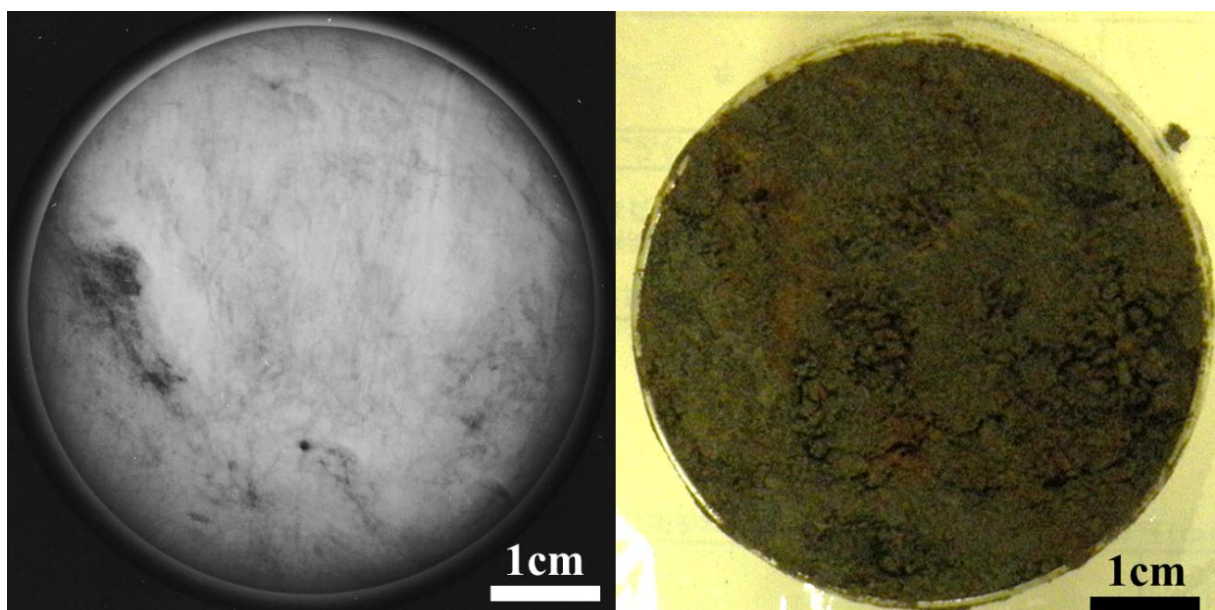


Photo 4-15 熊本Ⅲ層水平方向の軟 X 線画像(K11：透水試験，土壤水分特性試験)

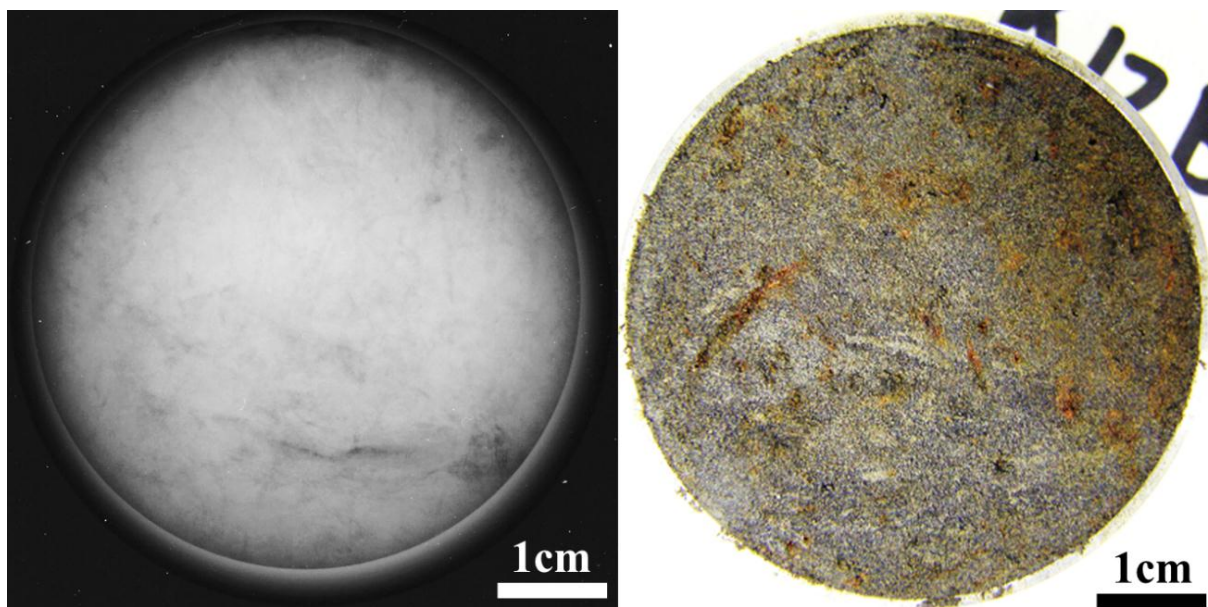


Photo 4-16 熊本Ⅲ層水平方向の軟 X 線画像(K12 : 限界負圧)

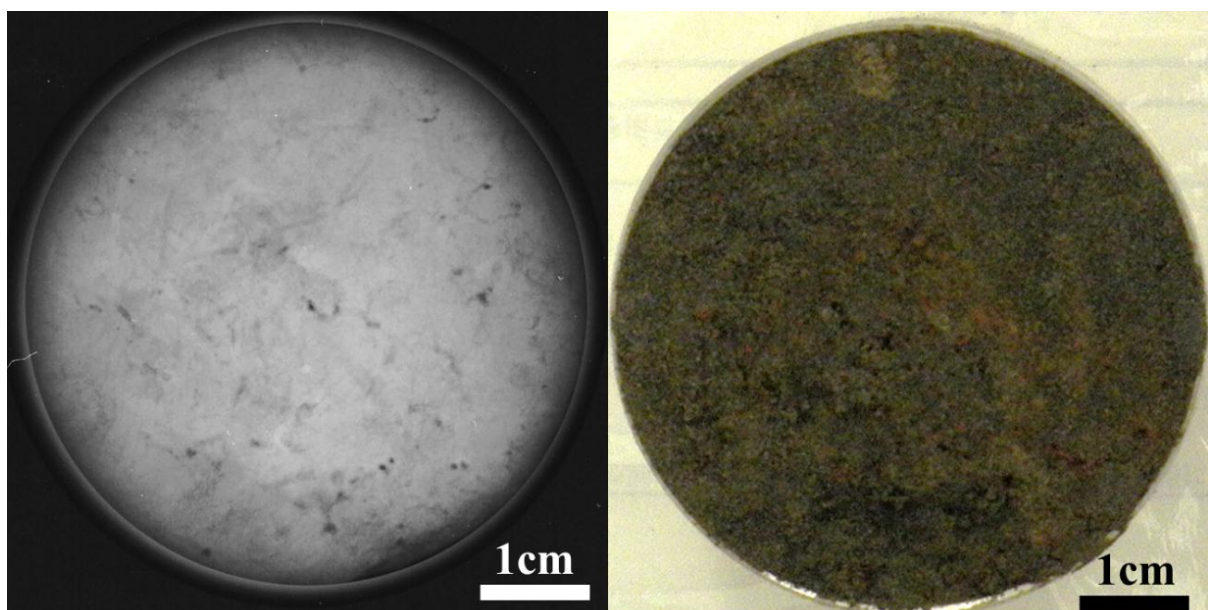


Photo 4-17 熊本Ⅲ層鉛直方向の軟 X 線画像(K13 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

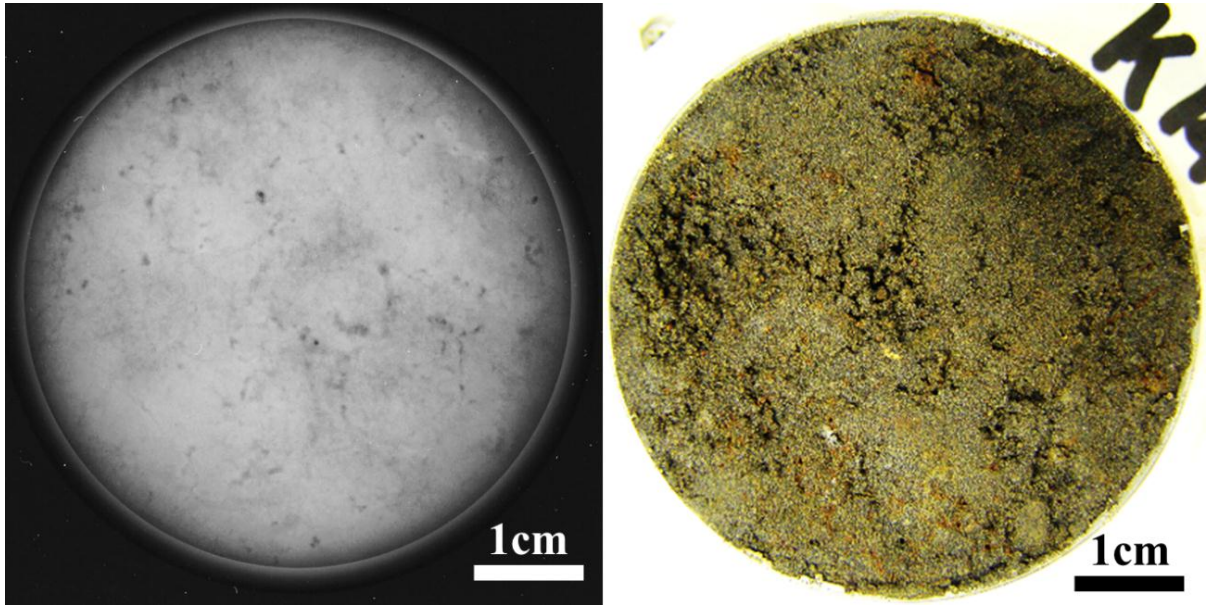


Photo 4-18 熊本Ⅲ層鉛直方向の軟 X 線画像(K14：限界負圧)

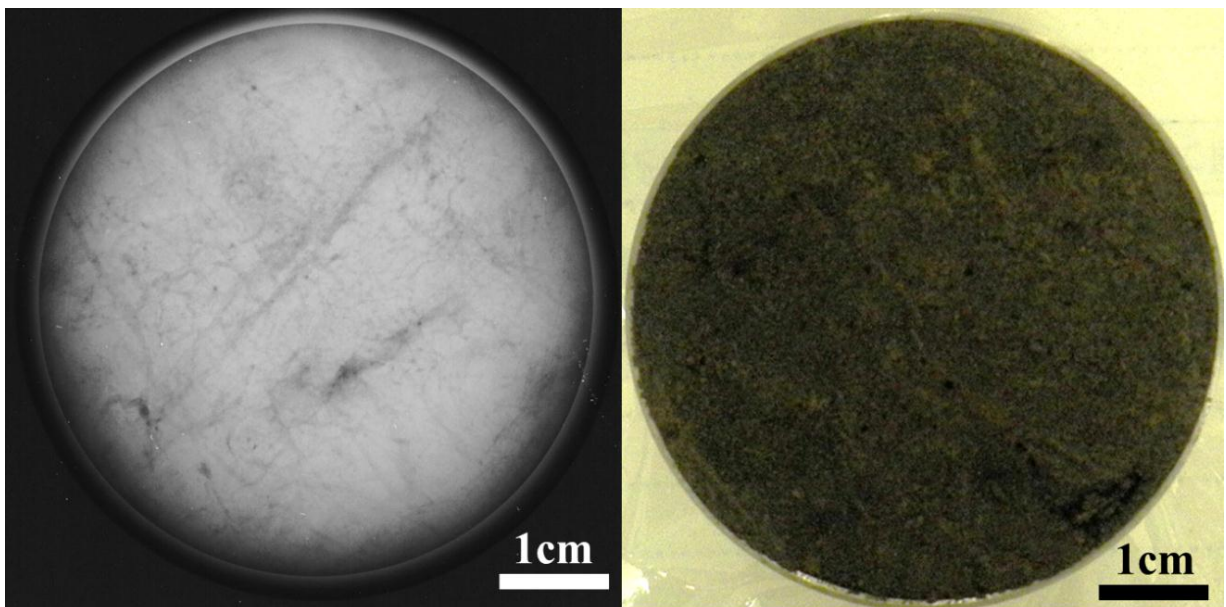


Photo 4-19 熊本Ⅳ層水平方向の軟 X 線画像(K16：透水試験，土壤水分特性試験)

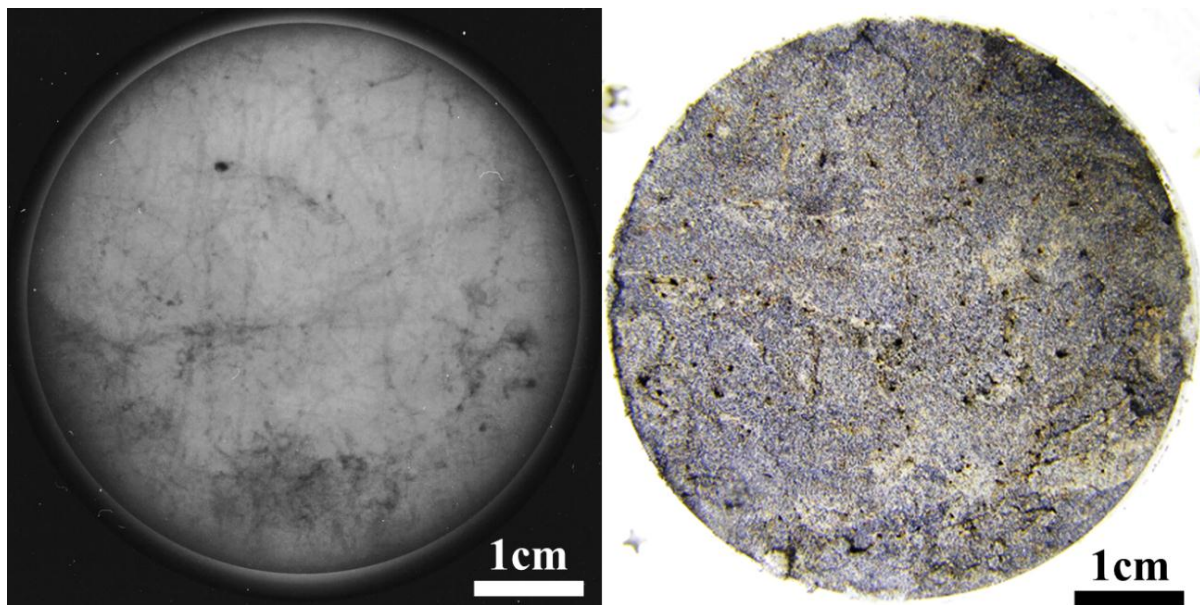


Photo 4-20 熊本IV層水平方向の軟 X 線画像(K17 : 限界負圧)

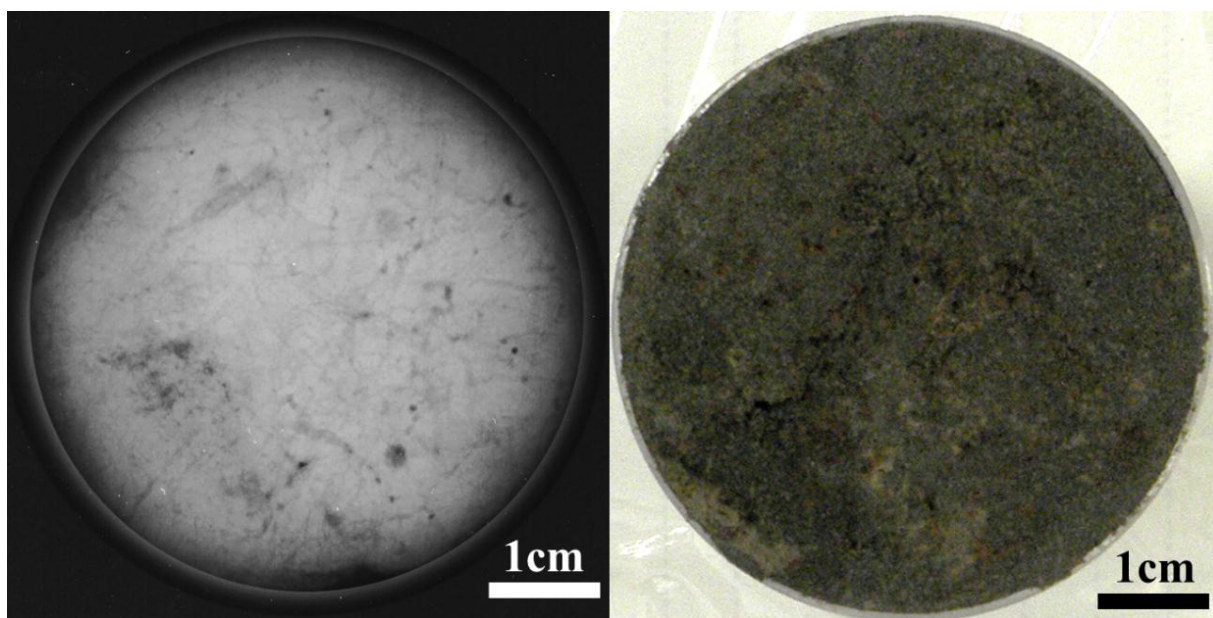


Photo 4-21 熊本IV層鉛直方向の軟 X 線画像(K18 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

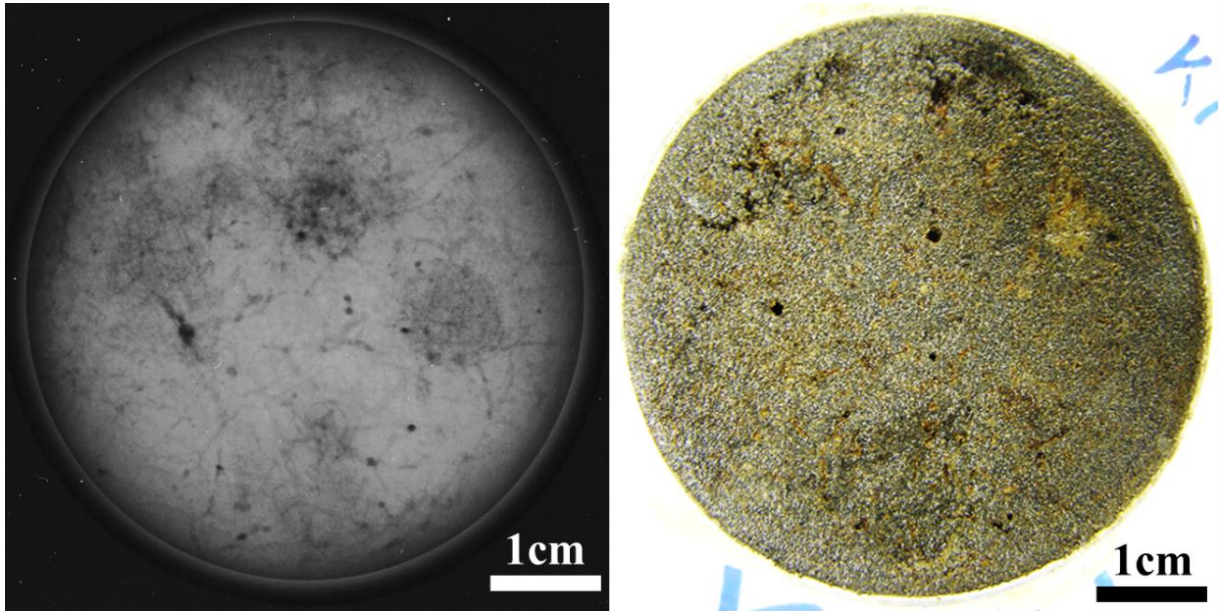


Photo 4-22 熊本IV層鉛直方向の軟 X 線画像(K19 : 限界負圧)

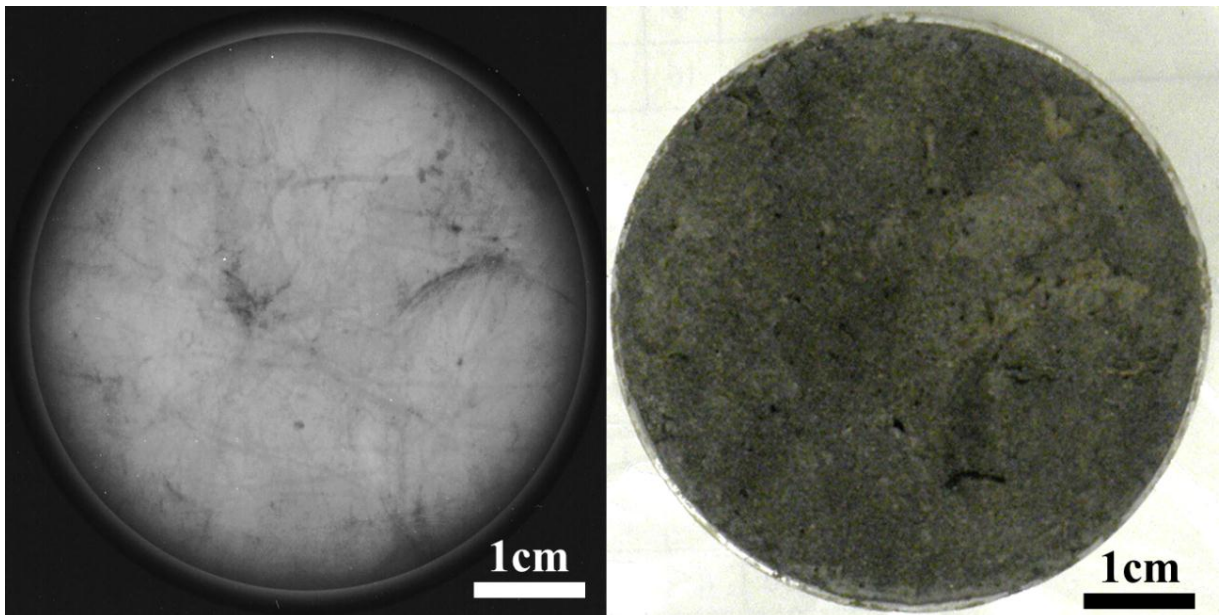


Photo 4-23 熊本V層水平方向の軟 X 線画像(K21 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

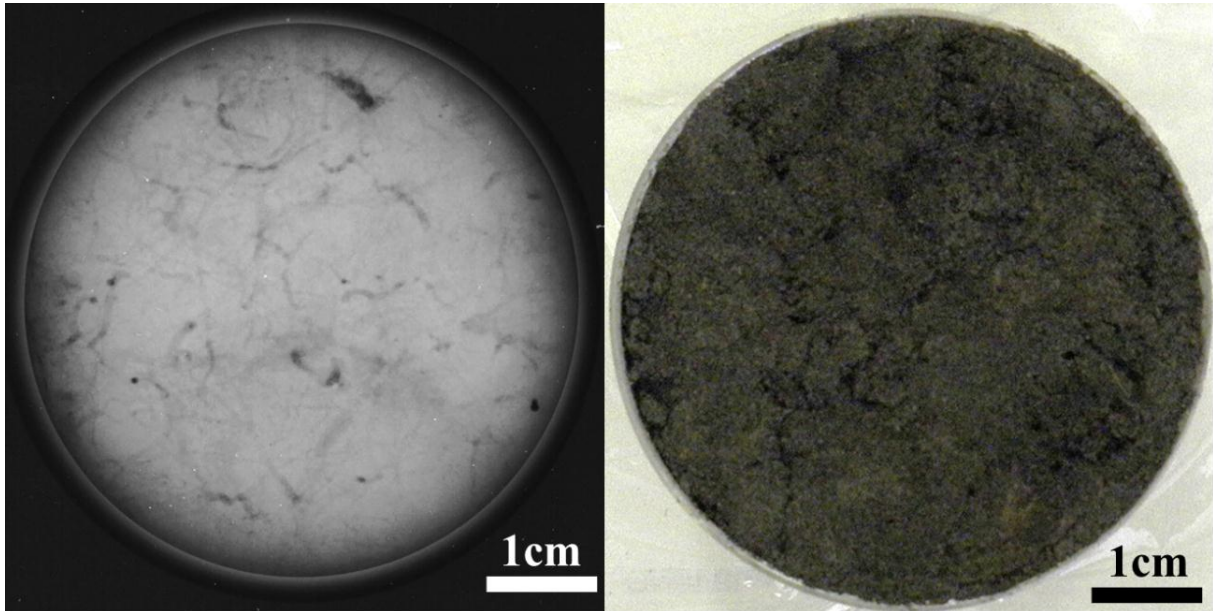


Photo 4-24 熊本V層鉛直方向の軟 X 線画像(K23 : 透水試験, 土壤水分特性試験)

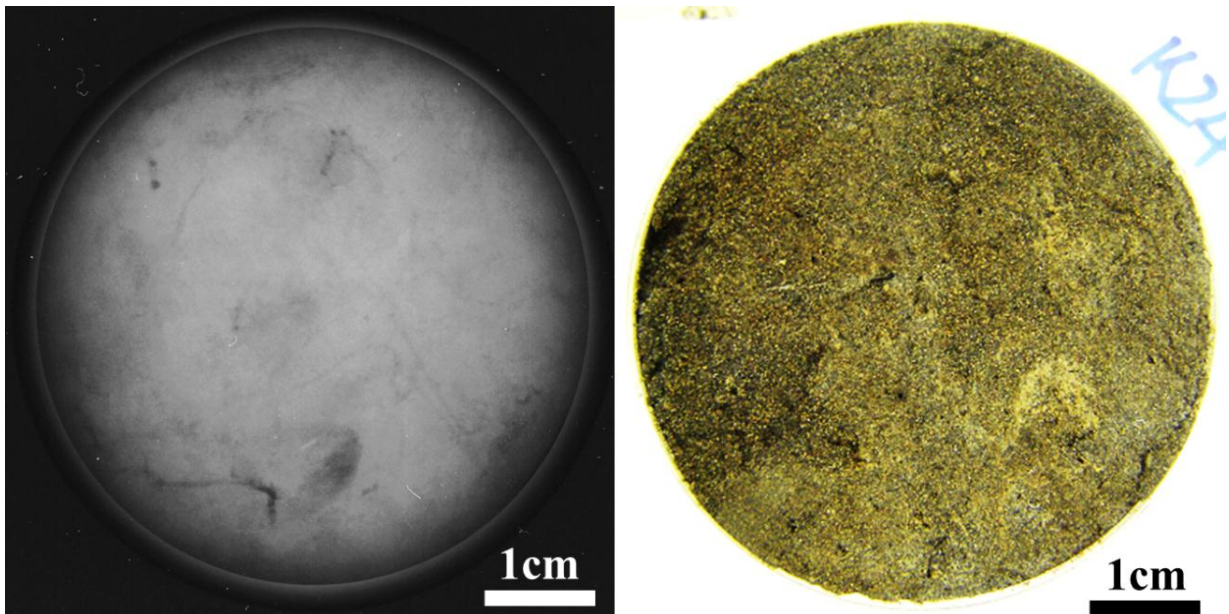


Photo 4-25 熊本V層鉛直方向の軟 X 線画像(K24 : 限界負圧)

4.2.6 面密度

面密度測定をした試料の軟 X 線画像について Photo 4-26, Photo 4-27 で示し、面密度測定を行った間隙について Fig. 4-53, Fig. 4-54 に示した。

面密度 3D グラフについて、斑鉄形成がある孔隙を Fig.4-55～Fig.4-59 に、斑鉄形成が無い孔隙を Fig. 4-60, Fig. 4-61 に各々示した。

また、斑鉄が円形状となっているポイントについて、X 軸, Y 軸についてそれぞれ分割した断面グラフを Fig.4-62～Fig.4-71 に示した。

(1) 面密度 3D グラフ

斑鉄形成されている間隙について Fig. 4-55～Fig. 4-59 をみると、間隙の縁の密度が大きくなり、斑鉄形成部分の密度が高くなる結果を示した。

斑鉄形成の無い間隙について Fig. 4-60, Fig. 4-61 をみると、間隙の縁の密度が大きくなることは無く、密度の盛り上がりはないことがわかった。

(2) 断面グラフ

真円に近い斑鉄形成をなした間隙について、Fig. 4-62～Fig. 4-67 をみると、間隙径の大小にかかわらず間隙の縁から 200～300 μm 外側に離れた位置に密度のピークが現れることが分かった。

孔隙径の推定は、孔隙の X 線画像を取った試料の平均面密度を求め、その平均値以下の値を孔隙と考えた。

このことより、斑鉄形成された管状孔隙の強度がわかった。そして、最も鉄の集積が起こっている位置が、孔隙の縁から 200～300 μm 外側に離れているため、摩擦や水分への溶解によって強度が落ちることなく保たれていることがわかる。

- 【Photo 4-26 面密度測定用試料】
- 【Photo 4-27 面密度測定用試料軟 X 線画像】
- 【Fig. 4-53 面密度測定ポイント A】
- 【Fig. 4-54 面密度測定ポイント B】
- 【Fig. 4-55 A1 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-56 A2 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-57 A20 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-58 A25 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-59 A29 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-60 A9 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-61 A24 の面密度 3D グラフ】
- 【Fig. 4-62 A2 の面密度 X 軸方向断面グラフ】
- 【Fig. 4-63 A2 の面密度 Y 軸方向断面グラフ】
- 【Fig. 4-64 A20 の面密度 X 軸方向断面グラフ】
- 【Fig. 4-65 A20 の面密度 Y 軸方向断面グラフ】
- 【Fig. 4-66 A25 の面密度 X 軸方向断面グラフ】
- 【Fig. 4-67 A25 の面密度 Y 軸方向断面グラフ】

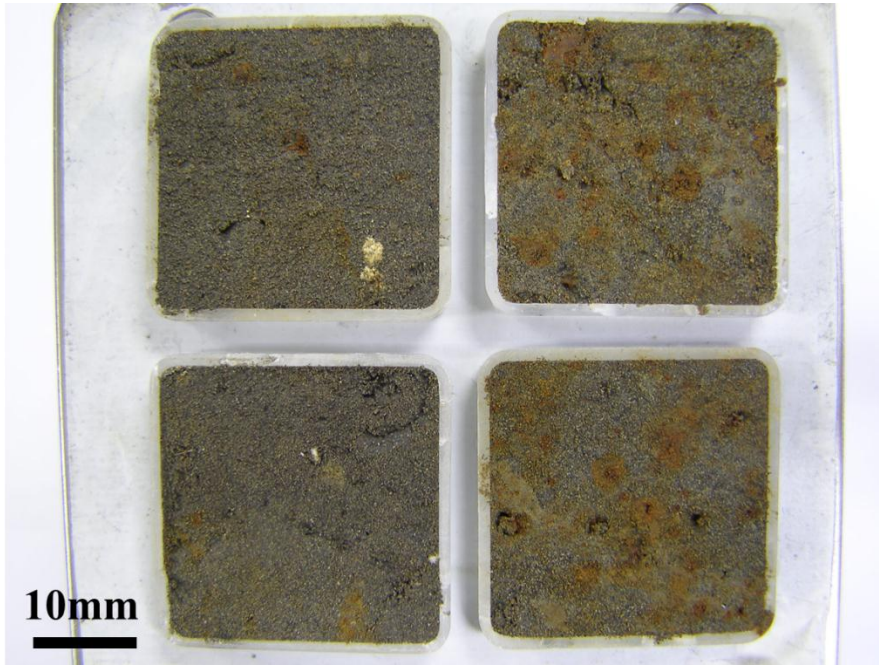


Photo 4-26 面密度測定用試料

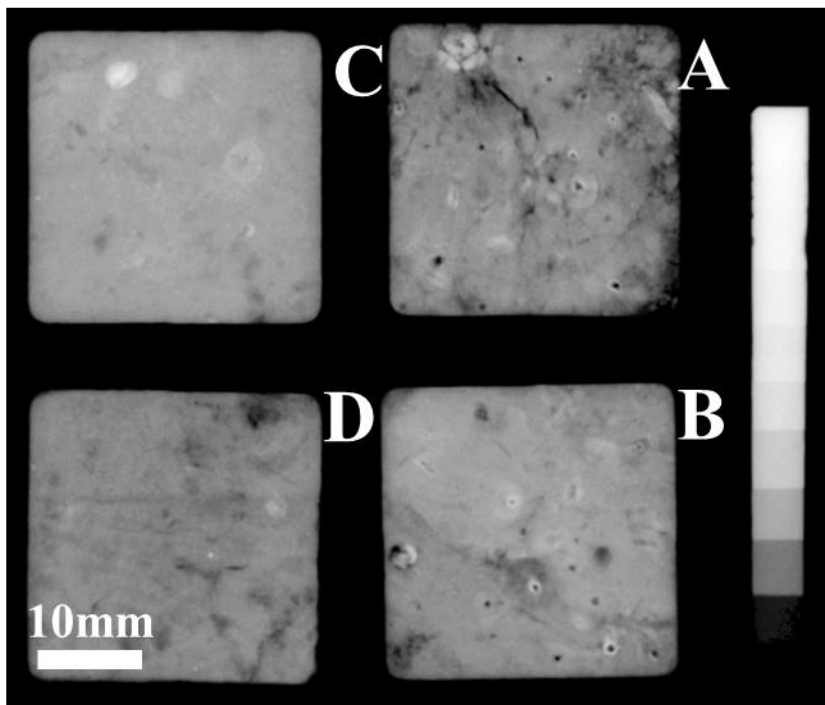


Photo 4-27 面密度測定用試料軟 X 線画像

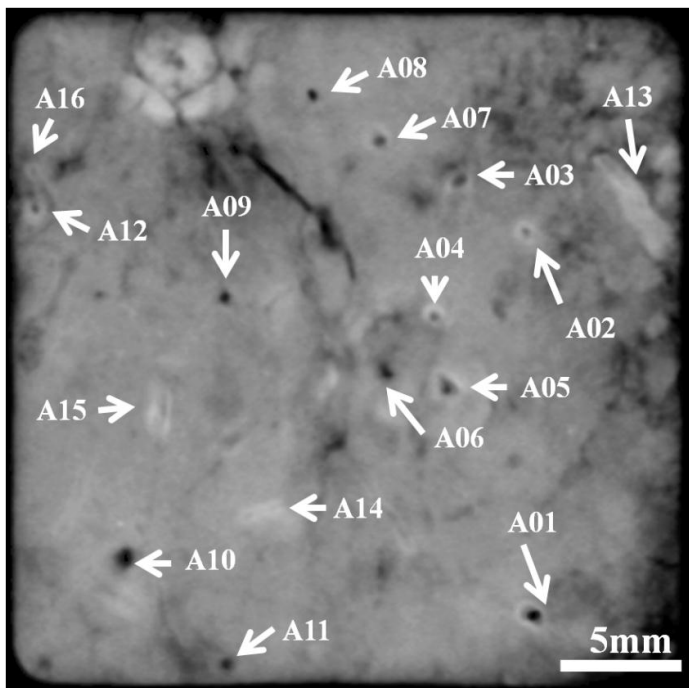


Fig. 4-53 面密度測定ポイント A

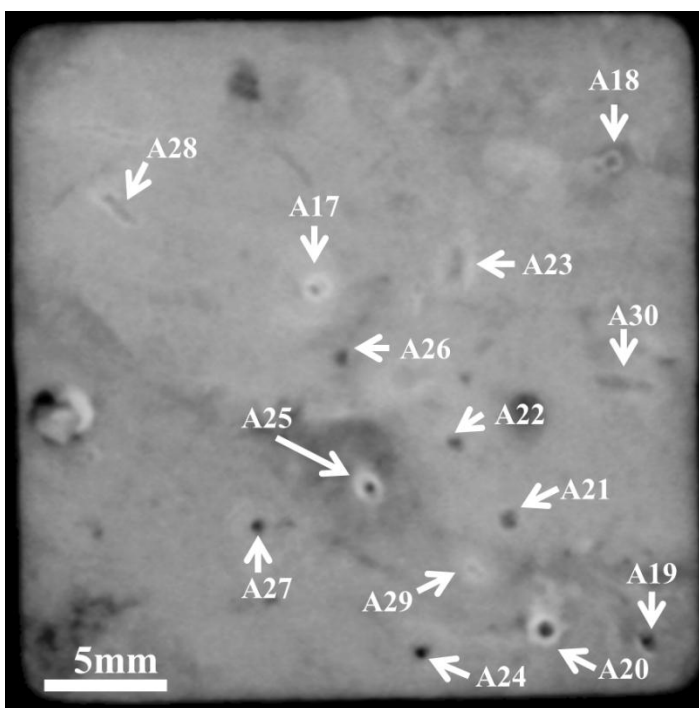


Fig. 4-54 面密度測定ポイント B

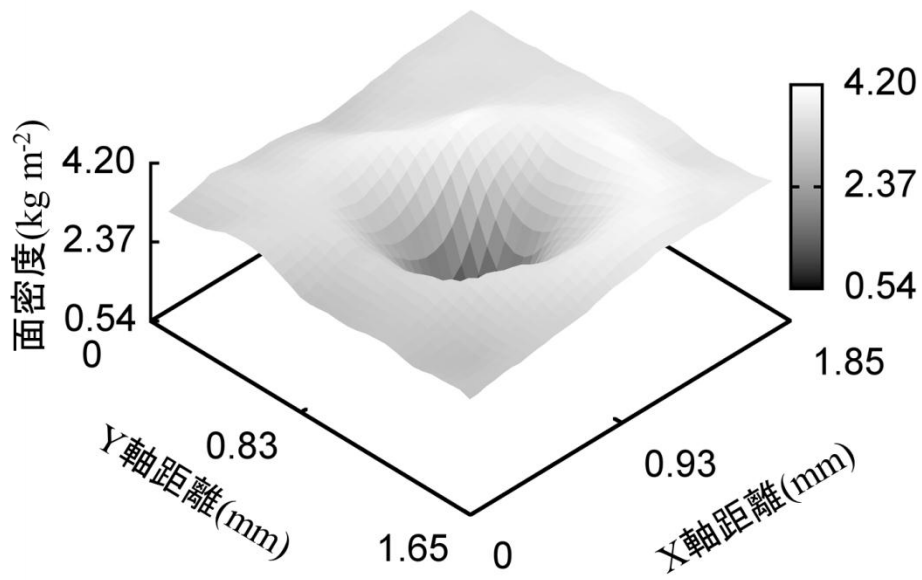


Fig. 4-55 A1 の面密度 3D グラフ

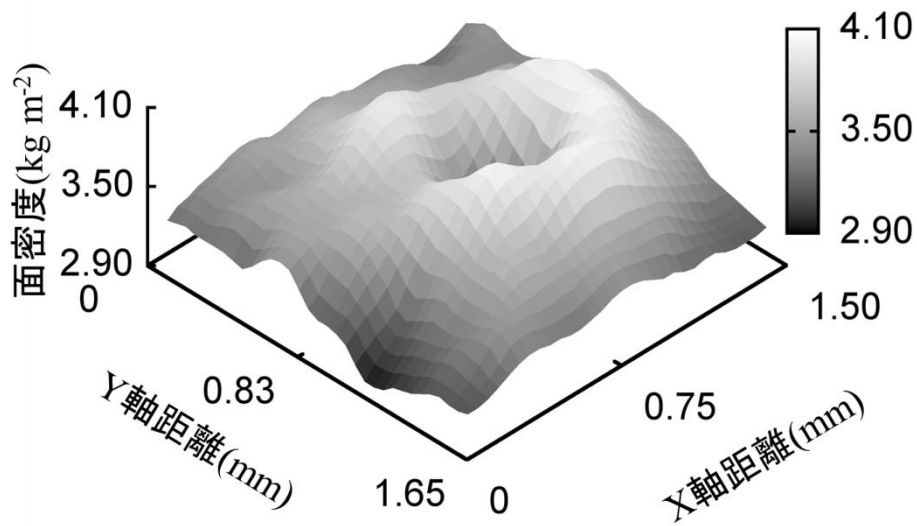


Fig. 4-56 A2 の面密度 3D グラフ

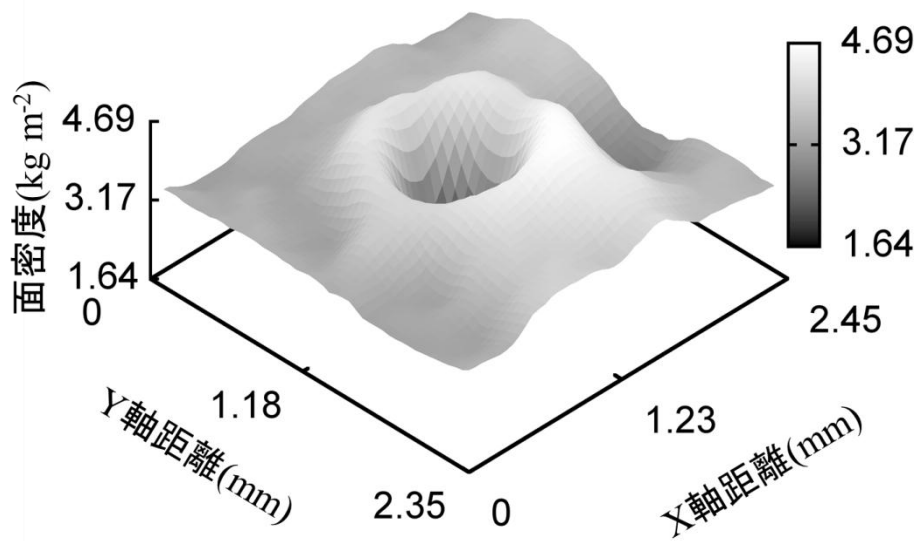


Fig. 4-57 A20 の面密度 3D グラフ

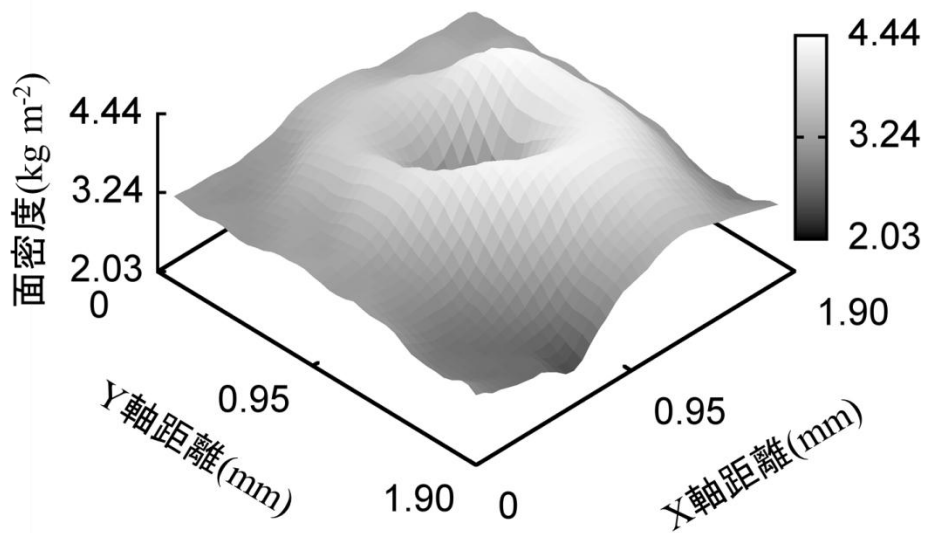


Fig. 4-58 A25 の面密度 3D グラフ

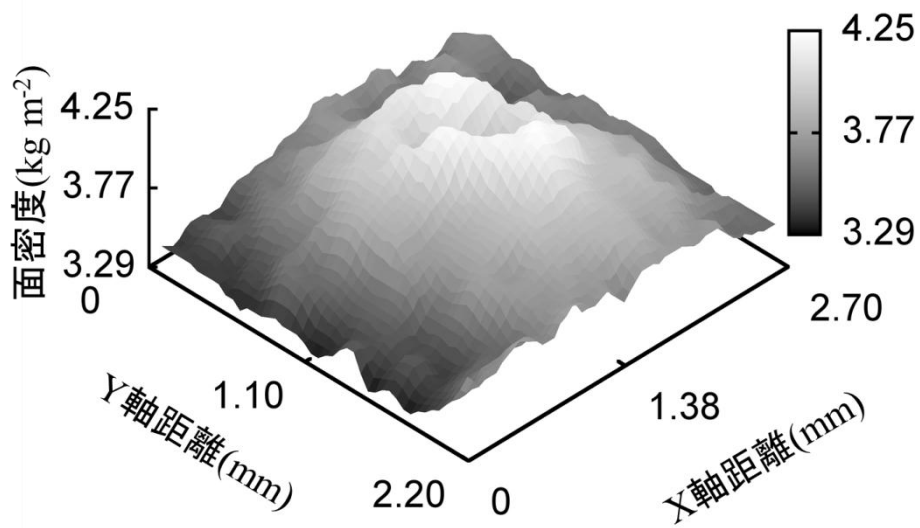


Fig. 4-59 A29 の面密度 3D グラフ

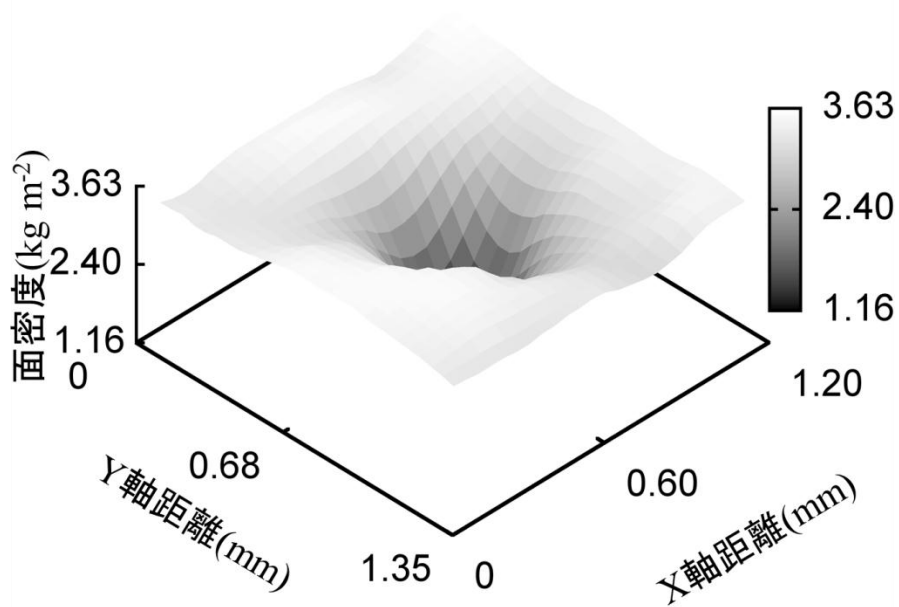


Fig. 4-60 A9 の面密度 3D グラフ

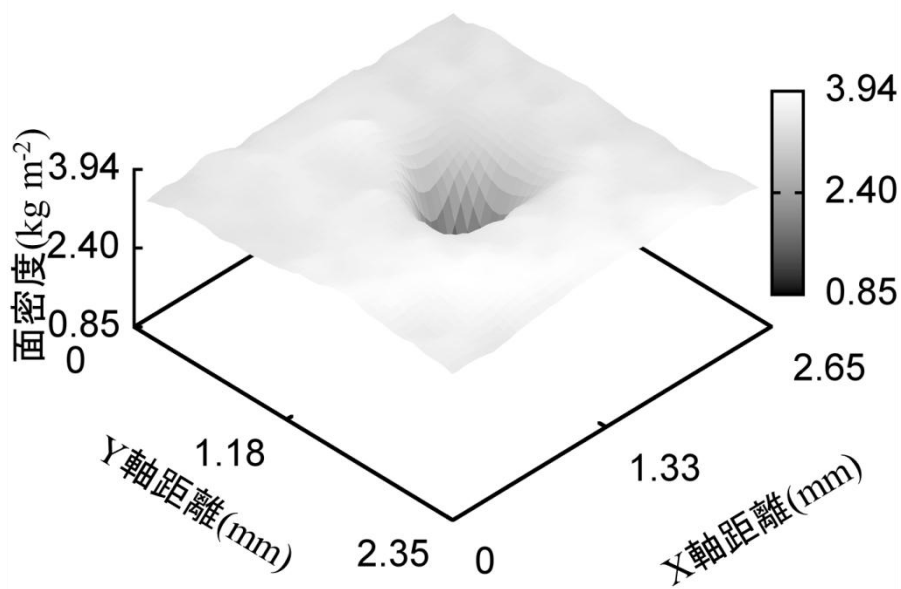


Fig. 4-61 A24 の面密度 3D グラフ

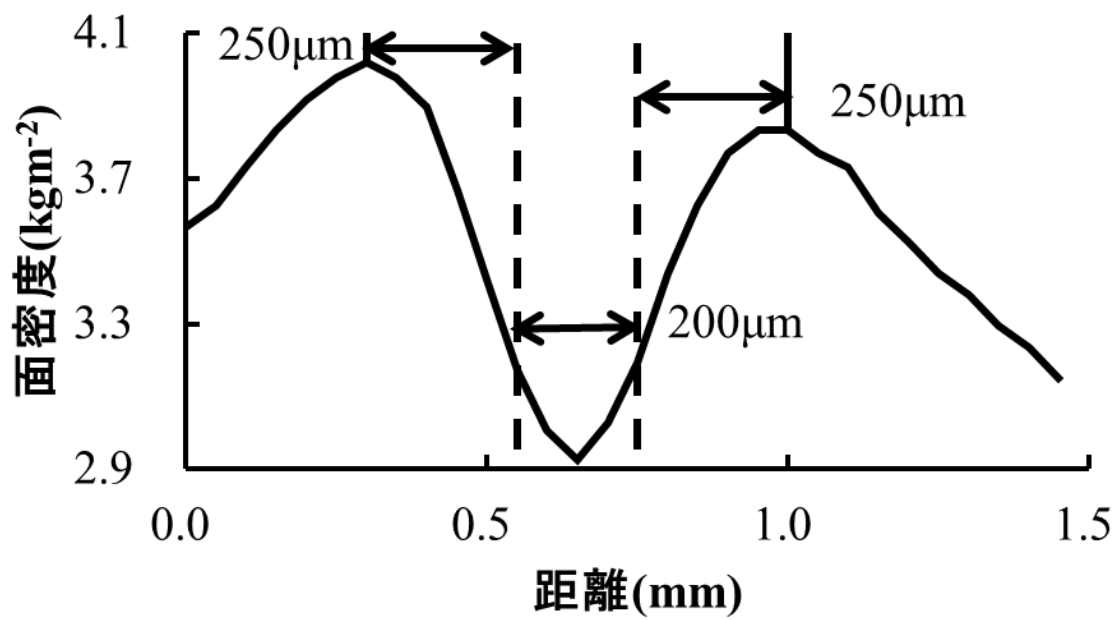


Fig. 4-62 A2 の面密度 X 軸方向断面グラフ

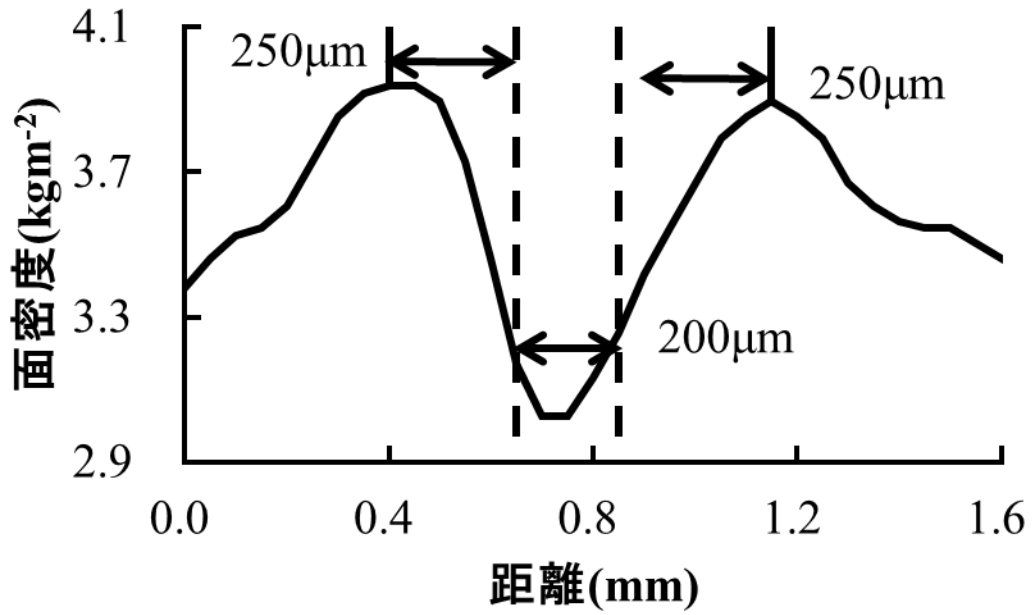


Fig. 4-63 A2 の面密度 Y 軸方向断面グラフ

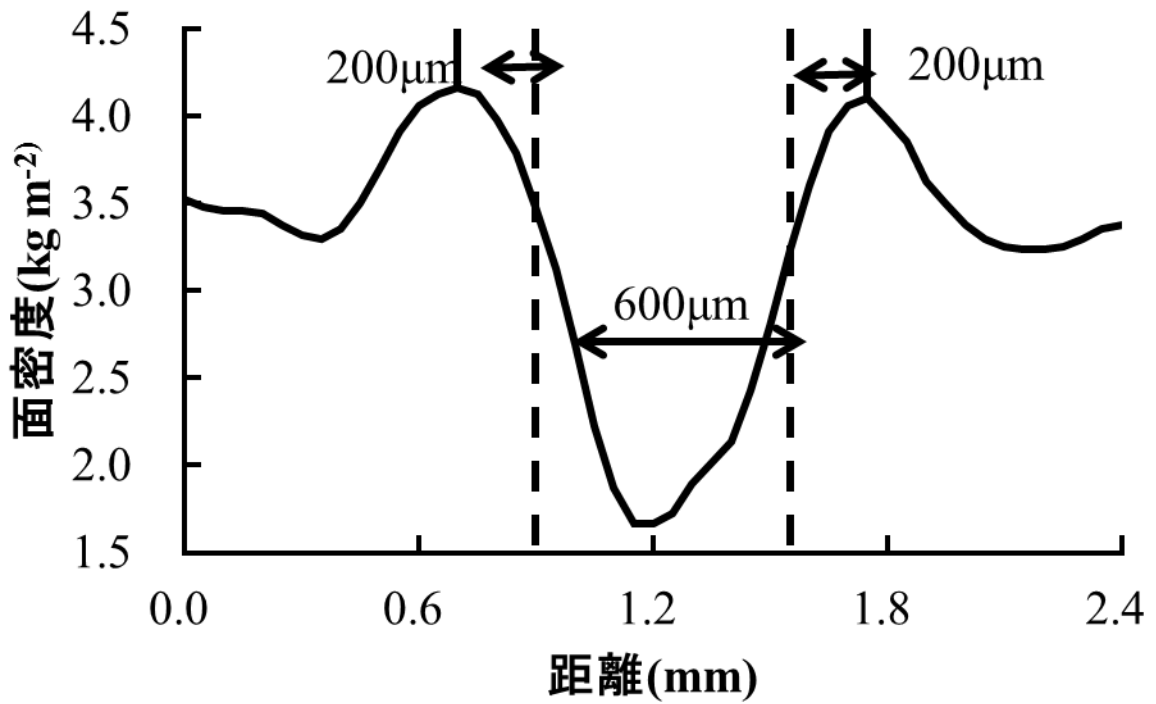


Fig. 4-64 A20 の面密度 X 軸方向断面グラフ

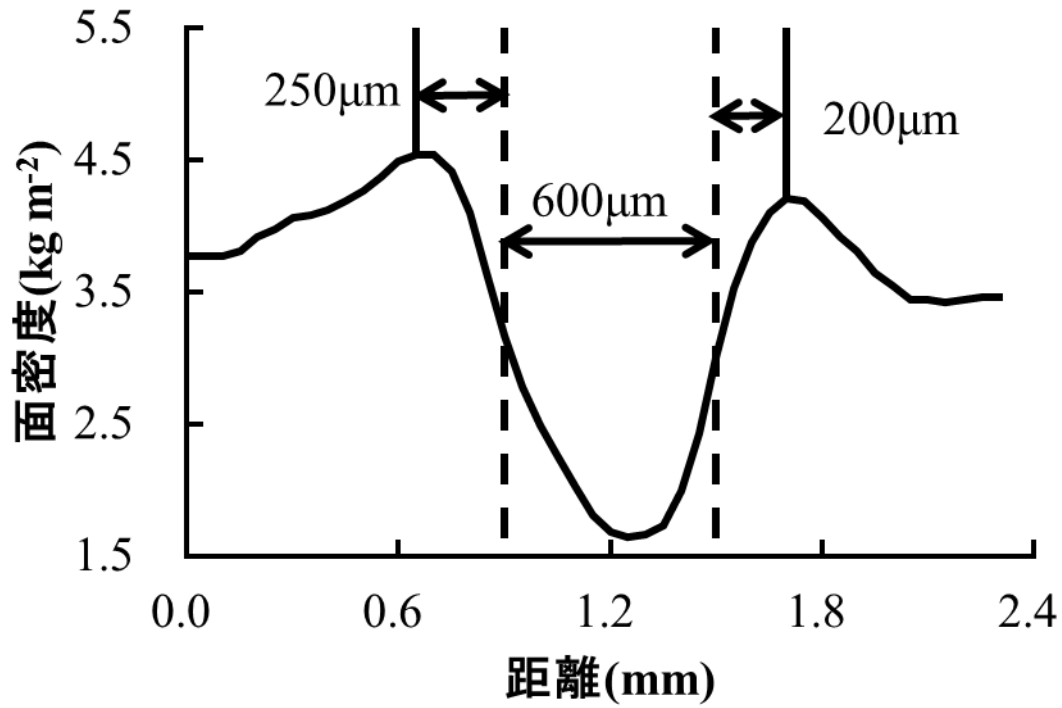


Fig. 4-65 A20 の面密度 Y 軸方向断面グラフ

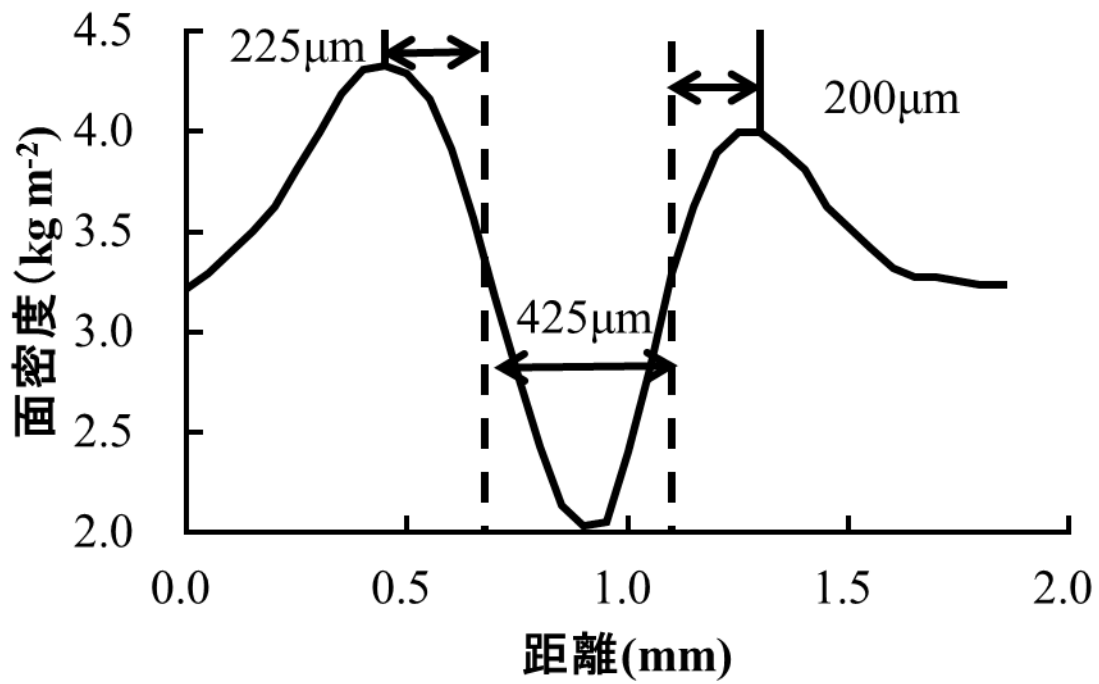


Fig. 4-66 A25 の面密度 X 軸方向断面グラフ

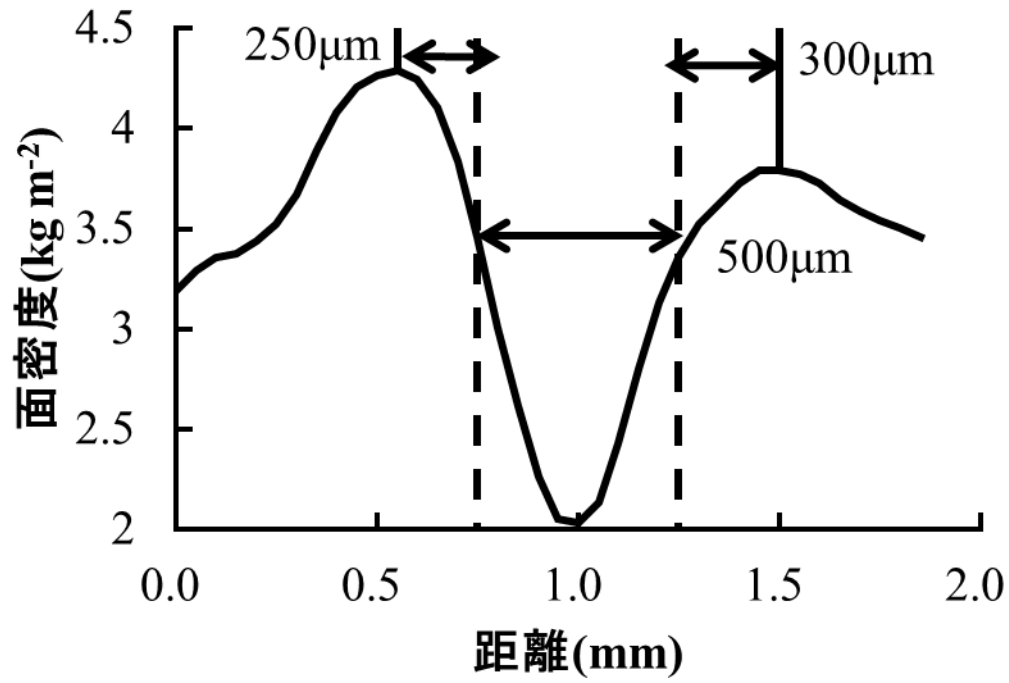


Fig. 4-67 A25 の面密度 Y 軸方向断面グラフ

4.2.7 表土水平面デジタル画像

作土層表層のデジタル画像を Photo 4-28 に、二値化した画像を Photo 4-29 に各々示す。同図で亀裂によって分断された土壌気質を、本論では「島」と呼ぶことにする。そして、作土層表層の亀裂近景の画像を二値化し、亀裂幅および島の平均面積を求め、Table 4-5 にまとめた。

また、斑鉄によって保存された管状孔隙の分布を知るため、比較的大きな管状孔隙は斑鉄層鉛直方向画像(Photo 4-5)、小さな管状孔隙は軟 X 線画像(Photo 4-18)を用いて斑鉄層に分布する管状孔隙の数を求め、Table 4-6 にまとめた。

(1) 亀裂状況

Photo 4-22 より、亀裂はほとんどが四角形型に割れており、亀裂断面も形状がはっきりわかるほど明確に割れていた。

Table 4-5 より、島を正方形と仮定すると、1 辺 25.8cm となり、比較的大きな形状をしている。亀裂は平均幅が 1.3cm で、島の一辺の長さと比較すると、亀裂の幅は小さいことがわかる。画像中に占める亀裂割合は 8%とかなり少なく、亀裂形成による島の細分化が行われていないことがわかった。

(2) 斑鉄分布状況

Table 4-6 より、斑鉄層の鉛直方向へ伸長する孔隙の割合は、1cm²あたりに 1mm 未満の孔隙数は 3~4 本、250cm²あたりに 3mm 以上の孔隙数は 1 本という結果になった。斑鉄層は、孔隙径 100μm~300μm の密度が多いが、1mm を超える孔隙も斑鉄によって保存されていることがわかった。

【Photo 4-28 作土層表層の亀裂近景】

【Photo 4-29 亀裂画像の二値化】

【Table 4-5 亀裂に関する各数値】

【Table 4-6 斑鉄層の管状孔隙に関する各数値】

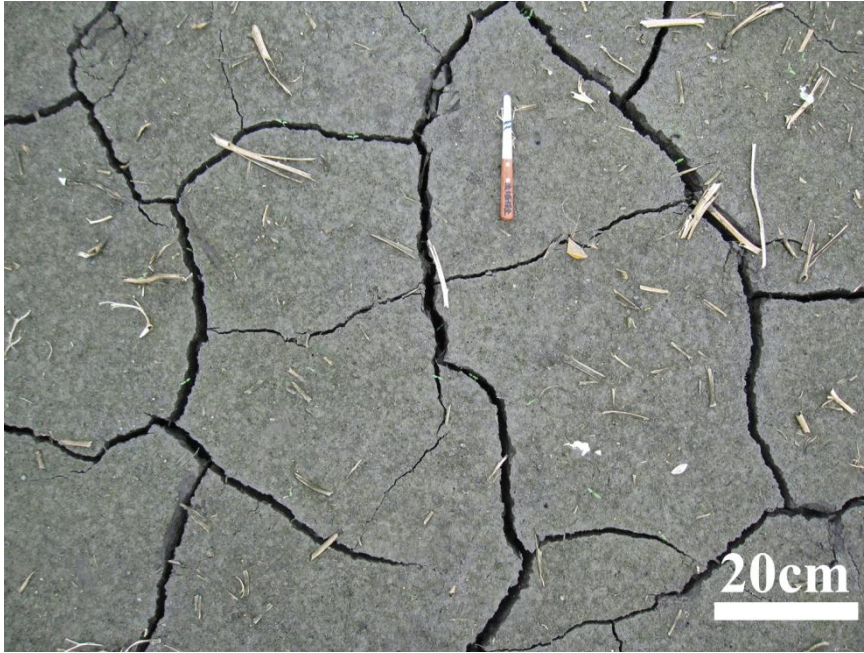


Photo 4-28 作土層表層の亀裂近景

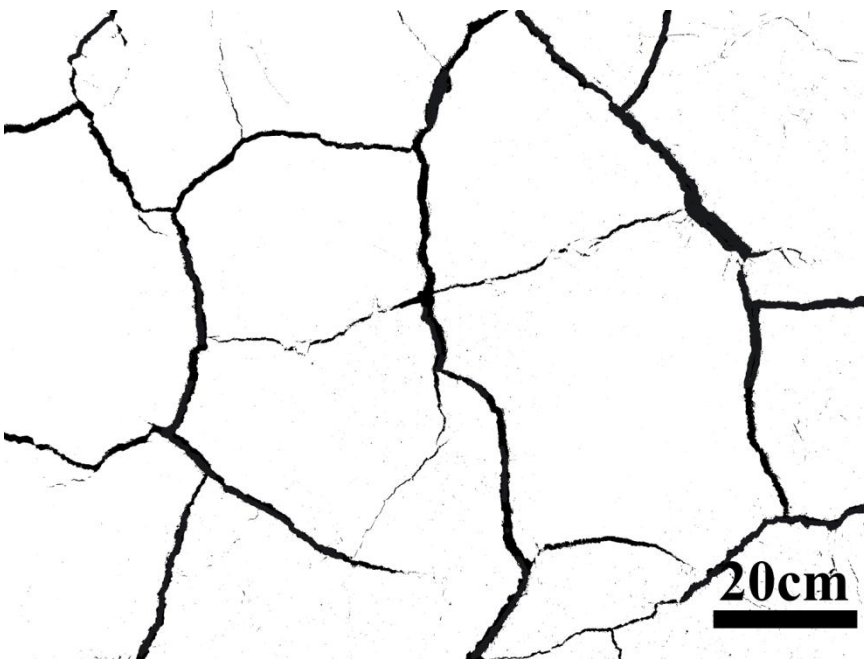


Photo 4-29 亀裂画像の二値化

Table 4-8 亀裂に関する各数値

画像サイズ	pix	cm
高さ	2736	92.920755
幅	3648	123.89434
面積	9980928	11512.356
基質の総面積	9265070	10689.886
島の平均面積		668.1179
1 辺の平均長さ		25.847977
亀裂の平均幅		1.3

Table 4-9 班鉄層の管状孔隙に関する各数値

K14 の管状孔隙分布		Photo4-5 の管状孔隙分布	
孔隙径(mm)	個数	孔隙径(mm)	個数
～0.1	7	3～4	4
0.1～0.2	29	1.0～1.4	2
0.2～0.3	17		
0.3～0.4	10		
0.4～0.5	4		
0.5～1.0	2		
合計	69	合計	6
試料面積(cm ²)	19.63	試料面積(cm ²)	1464.8
1cm ² あたりの孔隙数	3.51	1cm ² あたりの孔隙数	0.004

5. 考察

5.1 作土層および耕盤層の構造

調査した圃場の土層は、「作土層、耕盤層、心土層」に分けることができ、以下に作土層および耕盤層について考察する。また、各土層の実験結果を Table 5-1, Table 5-2 にまとめる。

(1) 作土層(熊本 I 層, II 層)

① I 層の土壌構造

I 層の構造を、土壌断面調査図、軟 X 線画像、透水係数から考える。

まず鉛直土壌断面図(Fig. 4-1)から、亀裂の深さは I 層で留まっていた。つまり、耕盤層を破壊するまでには至っていなかった。また、II 層ではすでに壁状の土層となっており、亀裂の構造発達は、比較的もろい I 層で発達することがわかった。

軟 X 線画像から、I 層(Photo 4-7~Photo 4-10)の水平・鉛直両方とも連続した管状孔隙が見られなかった。水平方向画像(Photo 4-8)では、亀裂と孔隙がみられたが、I 層に卓越する間隙とは考えられなかった。仮に根によって形成された孔隙(管状孔隙または根跡孔隙)であるとする、二次根といった細根による管状孔隙の卓越がみられるはずである。しかし、この孔隙以外の管状孔隙がみられないため、土壌生物による孔隙と推定した。

透水係数では、鉛直方向・水平方向どちらとも難透水性であった。I 層は連続した孔隙が見られないため、水は速やかに浸潤することができず、透水時間が長くなることが考えられる。また、I 層はほかの土層より粘土分が多く、より透水を阻害する土層となっていると考えられた。つまり、I 層の水の移動は、土壌の中を透水するのではなく、亀裂を経路にして透水が行われると考えた。

② II 層の土壌構造

II 層では土層が壁状となっている。これは畝立てなどによって掘り起こされる深さが I 層の範囲までと考えた。これは、軟 X 線画像、透水係数からも理解することができる。

軟 X 線画像から、II 層(Photo 4-11~Photo 4-14)では管状孔隙があった。特に鉛直方向の軟 X 線画像では、水平方向の管状孔隙が蜘蛛巣状に広がっており、土壌が攪乱されずトマトの根による管状孔隙が残っていると考えた。

透水係数では、鉛直方向、水平方向どちらとも大きかった。これは、軟 X 線画像からも確認できるトマトの根による管状孔隙が縦横網目状に存在しているため、透水、通気が良好な土層であると考えた。

つまり作土層は、難透水性で、亀裂以外の間隙が卓越しない I 層と、良透水性で作物の根による管状孔隙が卓越する II 層の二層構造を成していると理解できる。

(2) 耕盤層(Ⅲ層)

耕盤層では、軟 X 線画像(Photo 4-15～Photo 4-18)をみると、明らかに壁状となり、立体的な間隙の繋がりが減少したことがわかる。

水平方向の軟 X 線画像では、管状孔隙や、亀裂が存在し、鉛直方向の軟 X 線画像では、管状孔隙が点状に確認できる。このことから、管状孔隙は水平に広がらず、鉛直方向に進んでいることが理解できる。

透水係数については、水平方向の方が高い。これは、亀裂によって透水が速やかに行われたためと考えた。

しかし、亀裂自体は水平方向の軟 X 線画像(Photo 4-15～Photo 4-18)から、水平方向に卓越せず、鉛直方向にも卓越していない。つまり、亀裂は水平方向の透水についての役割を果たしているのではなく、亀裂が入ることによって、管状孔隙とつながる面積を増大させる役割があると考えた。

また、鉛直方向に伸びている管状孔隙の周りには斑鉄形成が見られた。現在この圃場は湛水栽培を行っていないため、昔の水田時代に形成された孔隙が保存されていると考えた。通常の転換畑では、暗渠管まで亀裂が伸び、耕盤層を破壊することがあるが、調査農地では亀裂は耕盤層にまで至らず、Fig.4-2 より土壌硬度は 27cm となっており、根の伸長ができなくなる 25mm を超えていた。

そのため、耕盤層を破壊し、心土層まで根を延ばすことは不可能だが、大小さまざまな管状孔隙が斑鉄形成により保存されているため、その孔隙を通り心土層まで伸びていると考えた。

つまり、耕盤層は、根が伸長できない硬度で、亀裂の卓越した形跡も無い壁状の層となっているが、斑鉄形成による管状孔隙により、鉛直方向への速やかな通気、通水が行われている層である。

【Table 5-1 各土層の基本的土壌物理性 1】

【Table 5-2 各土層の基本的土壌物理性 2】

Table 5-1 各土層の基本的土壌物理性 1

	土粒子密度 (Mgm^{-3})	粒度分布(%)			土性	塑性・液性		
		砂	シルト	粘土		PL ($g \cdot g^{-1}$)	LL ($g \cdot g^{-1}$)	Ip ($g \cdot g^{-1}$)
I層 作土層	2.772	73.20	11.10	15.70	SCL	0.27	0.39	0.12
II層	2.759	75.40	11.00	13.60	SL	0.24	0.38	0.14
III層 耕盤層	2.806	85.20	7.30	7.50	LS	0.25	0.38	0.13
IV層 心土層	2.764	84.50	6.00	9.40	SL	0.26	0.36	0.10
V層	2.748	85.10	6.90	8.10	LS	0.28	0.30	0.02

Table 5-2 各土層の基本的土壌物理性 2

	三相割合(%)			乾燥密度 (Mgm^{-3})	間隙率 (%)	限界負圧		透水係数		異方性 (K_H/K_V)
	固相	液相	気相			開放間隙径(mm)		鉛直方向 ($cm \cdot s^{-1}$)	水平方向 ($cm \cdot s^{-1}$)	
						鉛直方向 P_kV	水平方向 P_kV			
I層	45	43	12	1.24	55	0.115	0.231	9.E-07	7.E-06	7.95
II層	45	43	12	1.25	55	0.300	0.273	1.E-03	2.E-04	0.13
III層	44	45	11	1.24	56	0.200	0.088	6.E-05	2.E-04	3.17
IV層	46	48	6	1.28	54	0.429	0.375	1.E-03	2.E-04	0.15
V層	44	47	8	1.22	56	0.077		6.E-04	8.E-05	0.15

5.2 デジタル画像からみる亀裂の特性

作土層表層の亀裂(Photo 4-28)と亀裂の仕様(Table 4-5)から、亀裂の形成を考察する。

まず、表層の土性は砂質植壤土である。表土の亀裂は 10cm ほどの深さになり、島は平均して 1 辺 25cm の正方形ほどの面積を有している。細かく割れず、亀裂はほぼ 90 度で割れ、T の字型になるという特徴がある。

伊藤ら(1988)は、ベントナイトに砂を混合すると、砂分が多くなるにつれ、亀裂の角度が大きくなり Y の字型に割れることを示している。また、総質量の 40% を砂が占めるようになると、亀裂が明瞭に入らないという結果を示している。

しかし、この圃場では砂分が 70% 以上含まれる土壌であるにも関わらず、はっきりとした亀裂形成が見られた。伊藤らは、試料に厚みがあると、収縮による亀裂幅は大きくなると示している。また、同じ干拓地でも重粘土圃場である八郎潟干拓地の亀裂は、30cm～45cm もの深さまで入っている(農業土木学会, 1972)。

このことから、調査地の亀裂は、砂分が多いのに対して 10cm 程度の層厚であるため、乾燥による収縮により亀裂は形成される。しかし、重粘土圃場のような大幅な収縮が起こらない理由は、砂分が多いことにより、作土層表層の粘土の収縮量が抑えられてしまう。そのため、耕盤層に至るほどの亀裂は発生しなかったと考えた。

5.3 粗間隙の形成

これまでに論じた各土層の特徴および考察の結果より、調査農地での各土層の間隙モデルを Fig. 5-1 に示した。

(1) I 層(作土層上層)の間隙構造

調査農地ではトマト栽培の後、畝を戻し、圃場を一か月半湛水し、その後水抜きを行う。土壌が乾燥し、一定の地耐力を得たら再度耕耘している。つまり、Fig.5-2 のような過程を経て、表層の亀裂形成をしていると考えた。

I 層は、亀裂から団粒化には進まず、もしくは進む前に耕起されているため、亀裂以外の間隙発達が行われない。そのため、I 層の間隙は、乾燥による亀裂のみが発達し、土壌自体は単粒構造であると考えた。

単粒構造状態と判断した理由について、透水性、限界負圧および pF 水分分布曲線の特徴が挙げられる。

限界負圧では、鉛直方向(Fig. 4-23)の傾向より、開放間隙が一つ出来上がるまでにかかる負圧が高いことがわかる。実験の開始と終了では、脱水が停滞し、負荷圧が 5cm ~16cm まではある程度一定の脱水が進行している。

これは、Fig. 5-3 に示す状況になっていると考えられる。作土層断面(Photo 4-2)をみると、土壌試料写真の表面には細かな亀裂があり、限界負圧で使用した試料(Photo 4-10)にも、亀裂がある。つまり、初期の段階では、亀裂のメニスカスより大きい負荷圧になるまで脱水されず、亀裂への大気侵入が始まると比較的速やかに脱水される。しかし、その亀裂が終わると単粒構造で壁状の土壌となる。

そのため、実験の終期では、壁状の土壌のメニスカスに勝るまでの負荷圧まで、再脱水が行われない状況になると考えた。

pF 水分分布曲線(Fig. 4-43, Fig. 4-44)では、水分保持能力は、毛管水側が支配している。つまり粗間隙量は乏しく、細間隙が多いことがわかる。細間隙は団粒内にも卓越するが I 層は難透水性であるため、団粒形成による細間隙ではなく、単粒状態による細間隙だと考えられる。

以上の特徴から、I 層は土層に亀裂が入り、乾燥が進行しても団粒形成が起こらず、土塊も粒状に崩れない単粒構造であると判断した。

(2) II 層(作土層下層)の間隙構造

II 層の間隙構造は、トマトの根による管状孔隙が主体と考えた。III 層は堅い土層のため、根は水平方向への伸長が主体となる層である。そのため、水は自由に動くことができる縦横のつながりを持った管状孔隙が、通水・通気の主体と考えた。

これは、限界負圧、pF 水分分布曲線、透水性からも把握できる。限界負圧(Fig. 4-26, Fig. 4-27)では、比較的低負荷圧で間隙開放が行われている。pF 水分分布曲線(Fig. 4-45,

Fig. 4-46)では，粗間隙帯の水分分布が多く，透水性も大きい。

以上のことから，Ⅱ層の間隙構造は粗間隙形成が卓越しており，粗間隙が立体的な広がりを持ち，速やかな排水を促している層と考えた。

(3) Ⅲ層(耕盤層)の間隙構造

Ⅲ層の間隙構造は，鉛直方向の大小様々な管状孔隙が斑鉄により保存された構造と考えた。

管状斑鉄について，斑鉄層(Photo 4-6)より，保存されている間隙径は1mm以上のものもある。そのため，排水性が良く，心土層へ根を伸ばすときに，1mmほどの孔隙を伝っている。

また，1mm以上の孔隙を排除した試料での限界負圧(Fig. 4-29)は，鉛直方向の間隙の開放は比較的速やかに開放され，水分分布曲線(Fig. 4-48)も粗間隙，細間隙が一樣に存在する。つまり，間隙径によって，水分，大気の移動，根の伸長に関わる役割が異なっていると考えた。

(4) Ⅳ層，Ⅴ層(心土層)の間隙構造

Ⅳ，Ⅴ層の間隙構造は，心土へ伸長したトマトの根による孔隙が存在する構造と考えた。

Ⅳ層は耕盤層を通過した後の土層であるため，根の広がりには良く，Ⅱ層ほどではないが，鉛直・水平方向の物質移動は容易に行える。

Ⅴ層は，鉛直方向への伸長はあるものの，水平方向の伸長は乏しいため，間隙構造は鉛直方向への孔隙が，水平方向への孔隙より多い。しかし，全体的に孔隙数は少なくなっており，特に Photo 4-19 では鉛直方向の試料だが，間隙がほぼ無く，壁状になっている。

つまり，根の伸長はⅤ層付近で減速しており，これ以上深く根が伸長しているとは考えにくい。そのため，水平・鉛直方向の間隙のつながりはさほど良くないと考えた。

【Fig. 5-1 各土層の間隙モデル】

【Fig. 5-2 調査地の湛水による表層土壌の変化】

【Fig. 5-3 Ⅰ層の大気侵入メカニズム】

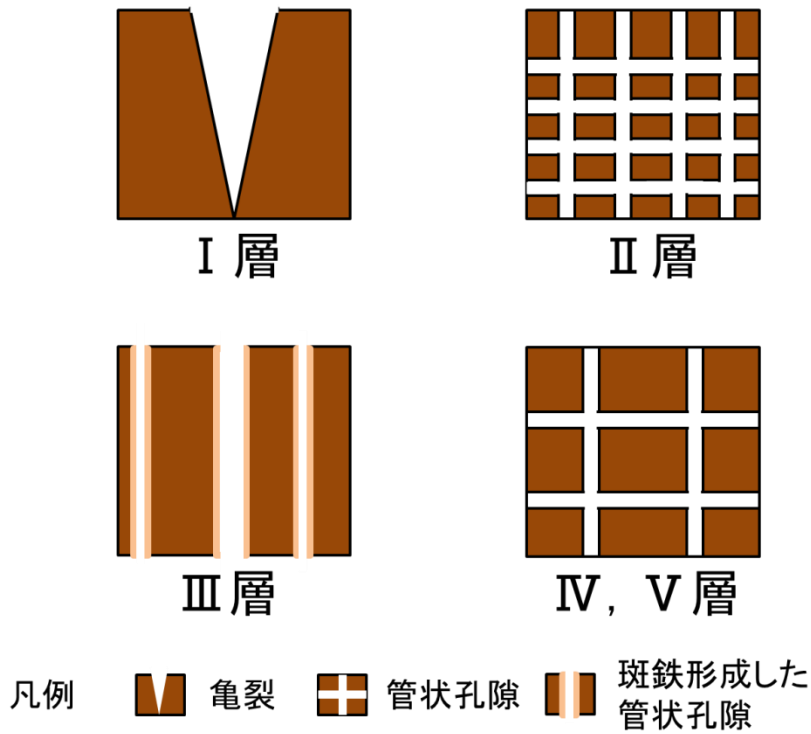


Fig. 5-1 各土層の間隙モデル

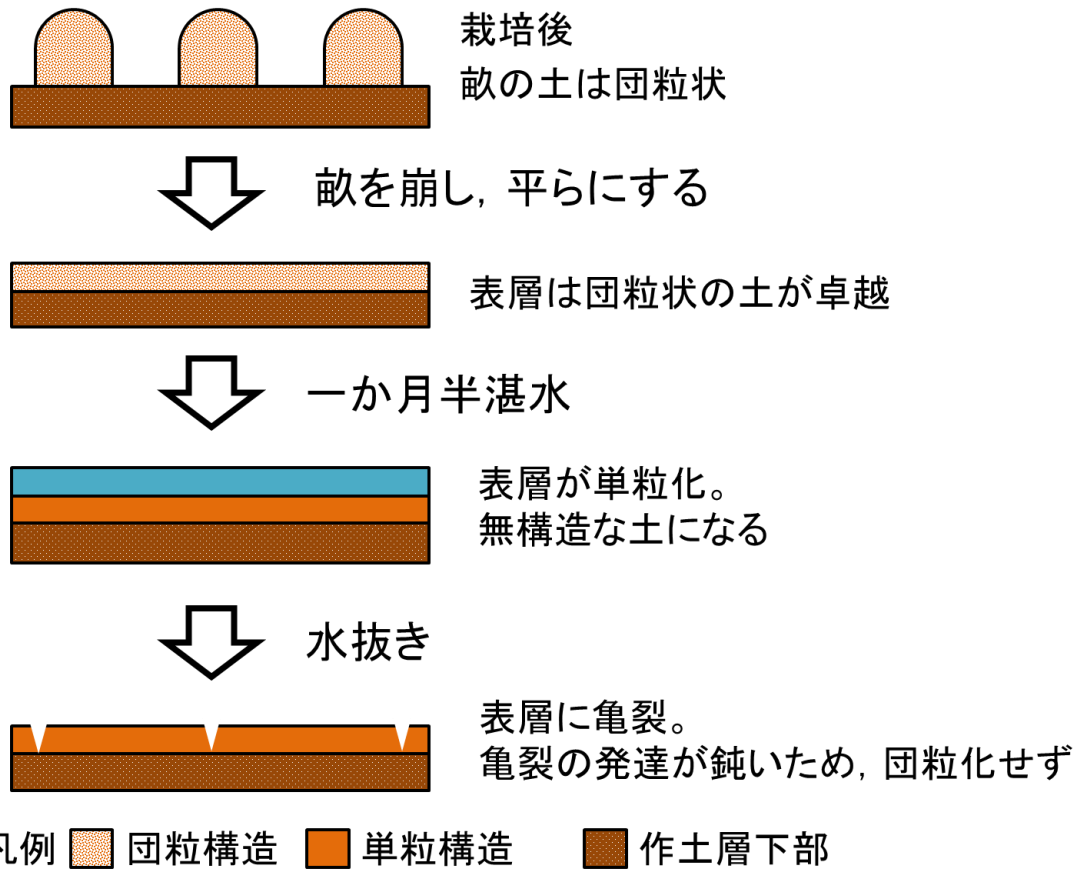


Fig. 5-2 調査地の湛水による表層土壌の変化

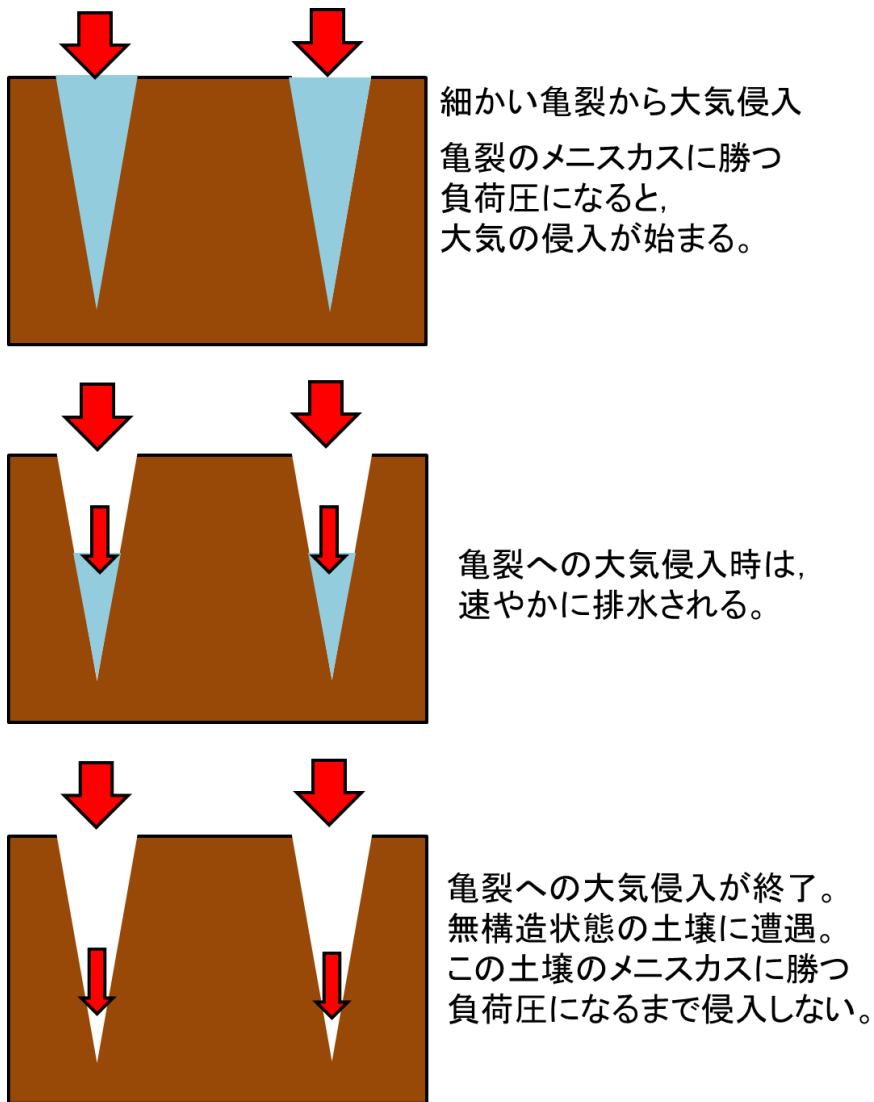


Fig. 5-3 I層の大気侵入メカニズム

5.4 各土層の亀裂および管状孔隙の接続性

これまでの論述をまとめ、Ⅰ層～Ⅴ層までの鉛直方向の間隙の接続性を Fig. 5-4 にまとめた。

(1) Ⅰ層(作土層上部)での間隙の接続性

Ⅰ層は、湛水下では亀裂が発生しないため、浸透による水移動が主体となるため、表層の水はけは悪く、Ⅱ層目との接続性も悪い。しかし、湛水が終わり、表面に亀裂が入ると、Ⅱ層へ速やかに通気通水が行われる。

(2) Ⅱ層(作土層下部)での間隙の接続性

Ⅱ層では通気性、透水性が良く、比較的水は自由に動ける層となる。そのため、Ⅱ層の間隙を通る水や大気は、Ⅲ層に到達すると水平方向に動き、Ⅲ層の排水の主体となる管状孔隙と連絡する。

そのため、Ⅲ層との接続性は非常に良い。特に排水、通気に関しては、Ⅲ層に保存されている大きな間隙に向かって水平方向の移動している。

(3) Ⅲ層(耕盤層)での間隙の接続性

Ⅲ層では、管状孔隙が鉛直方向に伸長しているため、鉛直方向への移動が容易に行われる。管状孔隙の外側に班鉄がコーティングされているため、水平方向へ浸透したりせず、速やかに下層へ物質移動は行われる。

(4) Ⅳ層、Ⅴ層(心土層)での間隙の接続性

Ⅳ層では、管状孔隙の広がりⅡ層ほどではないが良くなるため、水平・鉛直方向の移動が容易であるため、Ⅲ層の管状孔隙とのつながりも良い。

Ⅴ層では、管状孔隙の広がりも乏しく、鉛直方向の移動が主体となる。Ⅳ層から伸びた根がⅤ層の管状孔隙を作っており、Ⅳ層との間隙の接続は良い。

このように、Ⅰ層が湛水されている間はⅠ層を浸透してきた水の移動は行われるが、大気の侵入は無い。Ⅰ層目に亀裂が入り、Ⅱ層目と亀裂が接続された後は、比較的速度やかに大気の侵入が始まると考えた。

【Fig. 5-4 各土層の間隙構造と繋がり】

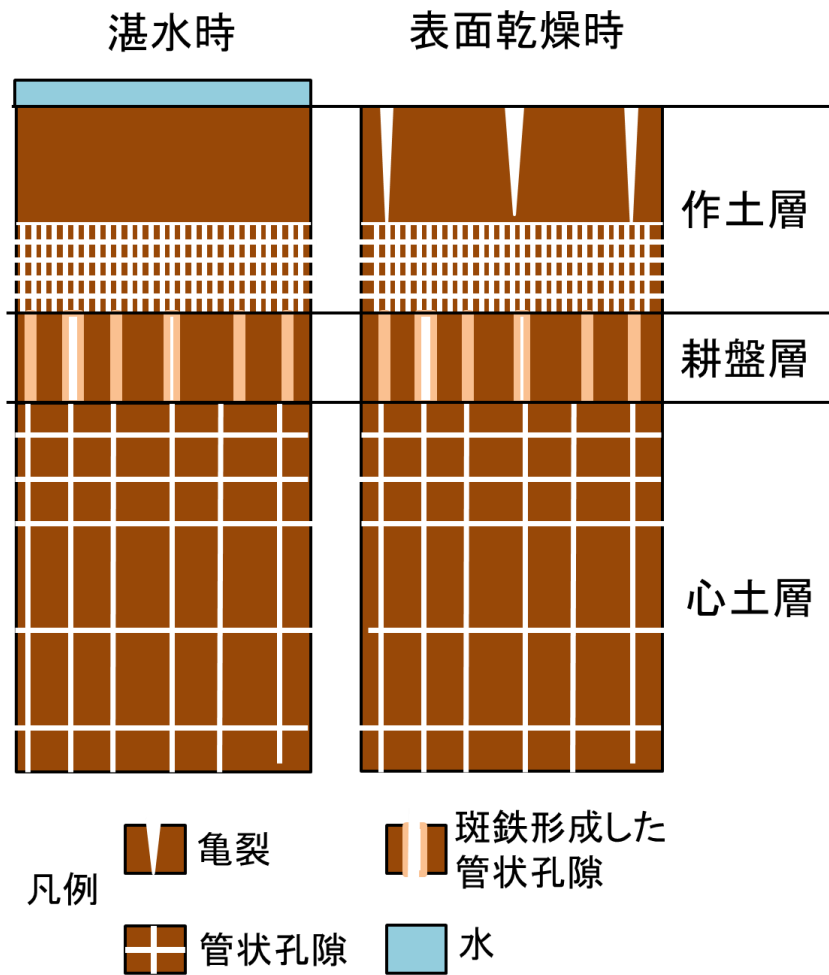


Fig. 5-4 各土層の間隙構造と繋がり

5.5 地下水位変動による粗間隙の影響

調査地に隣接する有明海は、潮汐による潮位差が大きく、調査地の熊本では平均潮差はおおよそ2~3mもある。そのため、潮汐変動による地下水位の変動が起こり、粗間隙内に負圧がかかる。

そのため、引き潮時と上げ潮時での粗間隙の影響を考察する必要がある。また、引き潮時、上げ潮時による影響を Fig. 5-5, Fig. 5-6 に示した。

(1) 引き潮時

引き潮により海面が後退し、地下水位が深くなる。そのため、土壤に負圧がかかり、孔隙を通して下方への水移動が行われる。

圃場が湛水状態であれば、地表面から土壤内への大気侵入は無く、水分移動のみと考える。つまり、湛水時期による引き潮は、湛水状態で分解される有機物から生成した栄養塩や、還元状況下で生成される硫化水素などが土壤水中に溶解込み、負圧により下方へ移動する。

潮汐変動は、一日に2周期あり、一度の引き潮により土壤中にかかる負圧が平衡する前に、上げ潮へ移行すると考えられる。そのため、引き潮上げ潮を繰り返し、徐々に下方への水移動を促進させている。

これにより、表層部の過剰な栄養塩の卓越を止めることが出来、硫化物生成の原因である硫化水素等、作物へストレスを与える物質の排除の役割も持っている。

圃場表面に亀裂が入っている状態であれば、水の移動と同時に大気侵入も始まる。そのため、酸化状態となる土層が増え、酸化による窒素固定といった、溶脱していた栄養塩が酸化され無機物として土壤に固定される。

(2) 上げ潮時

上げ潮により海面が上昇することで、地下水位も浅くなり、毛管上昇により上方への水移動が行われる。

そのため、通常地下水の影響がある土層の範囲が広がるため、根に対する塩ストレスがかかりやすくなる。また、地下水は、熊本平野から流れてきた地下水と海水が混ざった汽水であり、ミネラル分の補給も行われている。

このように、干拓地圃場で起こる現象を利用して、調査農地では塩ストレス栽培を行っている。

【Fig. 5-5 下げ潮時の水分・ガス移動】

【Fig. 5-6 上げ潮時の水分移動】

下げ潮時

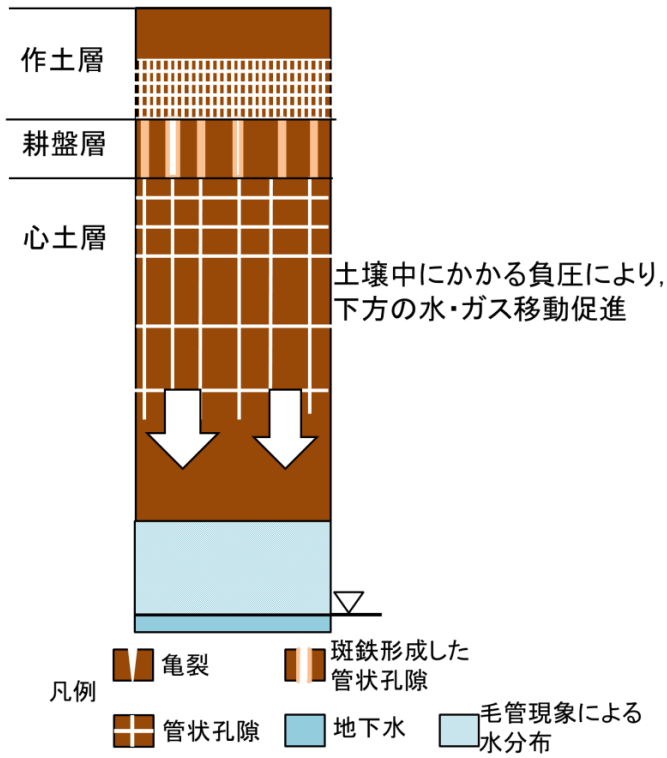


Fig. 5-5 下げ潮時の水分・ガス移動

上げ潮時

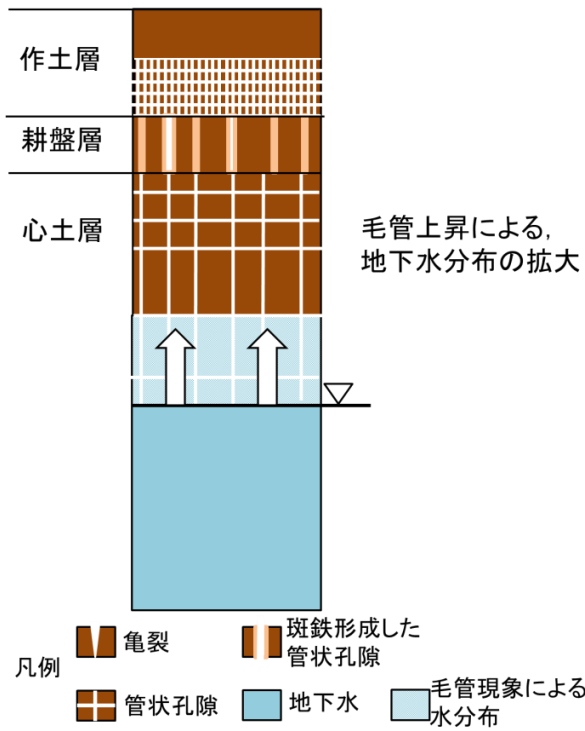


Fig. 5-6 上げ潮時の水分移動

5.6 総合考察

以上論述してきたことをまとめ、総合考察とする。

今回調査した干拓地圃場は砂質圃場であり、重粘土土壌とは異なった粗間隙形成があり、粗間隙を移動経路とする水分・ガスの移動にも、砂質圃場特有の特徴があった。

(1) 重粘土圃場で起こる亀裂による耕盤層の破壊，心土層への大気疎通が無い。

砂質圃場の場合，粘土による収縮が制限され，亀裂の鉛直方向への卓越が少なく，透水を制限する耕盤層を破壊できないという特徴がある。

(2) 耕盤層の斑鉄形成により保存された管状孔隙による通気・透水性保持

上述のように，難透水性の特徴を持ちながらも転換畑として営農可能であった理由の一つとして，斑鉄により保存された管状孔隙が挙げられる。下方への排水・通気の役割を亀裂ではなく，保存された管状孔隙が行っている。

(3) 潮汐変動による物質移動

調査農地は，潮汐変動により下げ潮時，上げ潮時に異なった影響を受けている。

下げ潮時では，地下水位が深くなることによる，圃場内の硫化物，過剰な栄養塩の排出，深層への大気侵入。

上げ潮時では，地下水位が浅くなることによる，作物への適度な塩ストレス，地下水からのミネラル配給が行われる。

この圃場で行われている作物栽培では，以上3つの現象を利用していると考えた。

6.おわりに

本論は、農地利用の多様化、大区画化によって農作物の安定供給を行えるよう、干拓地の土壌構造の解明を主眼にし、砂質土壌の干拓地の土壌物理性、管状孔隙の役割を把握することを目的として研究を行った。

それにより、間隙形成の違い、水田時にできた間隙の保存による圃場内の通気・通水への寄与。潮汐変動による通気通水の変化での間隙の役割など、人工的に造成された干拓地でも、場所、地質による特異性があることが解明できた。

以下に今後の課題についてまとめた。

(1) 地下水による物質移動の化学的動態

物理的に考えられる物質移動を化学的な目線で研究し、鉛直方向の物質移動の動態を解明する必要がある。

(2) 潮汐変動による地下水位変化のモニタリング

今回調査した圃場は有明海に面しており、非常に高い潮位差を持っていることが知られている。そのため、満潮時干潮時の地下水位をはかり、潮汐変動による水移動の動態を明らかにする必要がある。

(3) 管状孔隙に形成された斑鉄の定量的な研究

本論では密度の大小がはっきりと解明され、斑鉄形成による管状孔隙の強度上昇が理解されるが、使用した軟 X 線デジタル画像を取り入れた NAOMI-NX の解像度は、 $1\text{pixel}=50\mu\text{m}$ である。

今回 $100\mu\text{m}$ 単位での化学反応である事が確認されたため、解像度の上昇、圃場の土性の違いによる密度上昇位置の差異といった緻密な研究が要求されると考えられる。

謝辞

本論をまとめるにあたり、多くの方々のご協力・お力添えを頂きました。最後にご指導・ご協力くださった方々に感謝の辞を述べたいと思います。

三重大学生物資源学部・共生環境学科・地域保全工学講座・流域保全学教育研究分野教授の成岡市先生には、修士論文の指導教員として現地調査の準備、実施、本論の進め方など、多くのご指導を頂きました。また、本論完成にあたり、熱心に丁寧に指導していただき、誠に感謝の極みであります。

加治佐隆光教授，岡島賢治講師には，副査として論文を審査，訂正など，丁寧に指導していただき，心より感謝いたします。

また，熊本井手農場主の井手謙一氏には，調査のご協力をしていただき深く感謝いたします。

そして，三重大学生物資源学部・生物資源学研究科教務職員の廣住豊一博士には，実験の手順，知識など，多くのことをご教示頂き，本論執筆の際に，大変お世話になりました。

学部生4年生の原田寛氏，前田洋氏，杉浦麻菜美氏，吉田尚代氏には調査，実験に協力して頂きました。

多くの方々にお世話になり、本論文を完成させることができました。

ここに記し，心より感謝いたします。

引用・参考文献

廣住豊一，黒沢俊人，成岡市(2011)：土壤構造評価のための軟 X 線画像法ー軟 X 線画像法の開発とその適用例ー，土壤の物理性，第 119 号，pp3-15

廣住豊一，黒沢俊人，成岡市(2011)：土壤構造評価のための軟 X 線画像法ーガラスビーズおよび砂の粒径測定ー，土壤の物理性，第 119 号，pp17-28

廣住豊一，黒沢俊人，成岡市(2011)：土壤構造評価のための軟 X 線画像法ー微細粒試料の「土壤面密度」ー，土壤の物理性，第 122 号，pp3-14

井上久義(1988)：亀裂が発達した粘土質圃場における暗渠排水特性，農業土木学会論文集，第 137 号，pp25-33

石黒宗秀(1994)：土壤中の溶質移動におよぼす粗間隙の影響，日本土壤肥科学雑誌，第 65 卷，第 3 号，pp349-356

伊藤寛之，宮田雄一郎(1998)：マッドクラックのパターン形成実験，地質学雑誌，第 104 卷，第 2 号，pp90-98

地盤工学会(2010)：土質試験ー基本と手引きー，地盤工学会，p251

木村真人，和田秀徳，高井康雄(1984)：水稻根周辺における水酸化鉄、二酸化マンガン、硫化鉄沈殿の生成，日本土壤肥料科学雑誌，第 55 卷，第 4 号，pp332-337

木村真人，和田秀徳，高井康雄(1977)：水稻根圏に関する研究(第 1 報) 根圏土壤の理化学的性質(その 1)，日本土壤肥料科学雑誌，第 48 卷，第 3 号，pp85-90

熊本県(2005)：熊本地域硝酸性窒素削減計画，p120

熊田恭一(1949)：水稻幼植物の根圏土壤に関する研究(第 1 報)，日本土壤肥料科学雑誌，第 19 卷，第 5・6 号，pp119-124

森村大樹，成岡市，麻生昇平，武長宏，吉羽雅昭(1995)：湛水直播水田の土壤物理性とメタン生成，日本土壤肥科学雑誌，第 66 卷，第 6 号，pp632-638

成岡市(1991)：土壤の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究，東京農業大学総合研究所紀要，第 1 号，pp.1-58

成岡市(1993)：土壤粗孔隙の形態とその測定方法 土壤の不均一性と物質移動の研究前，日本土壤肥料学雑誌，第 64 卷，第 1 号，pp90-97

日本土壤学会(1979)：水田転作－田畑の高度利用－，博友社，p152

農業土木学会(1972)：八郎潟干拓地耕地整備委員会 総括報告書，p435

農林水産省 九州農業試験場(1988)：九州地域における 転換畑作技術指針，p358

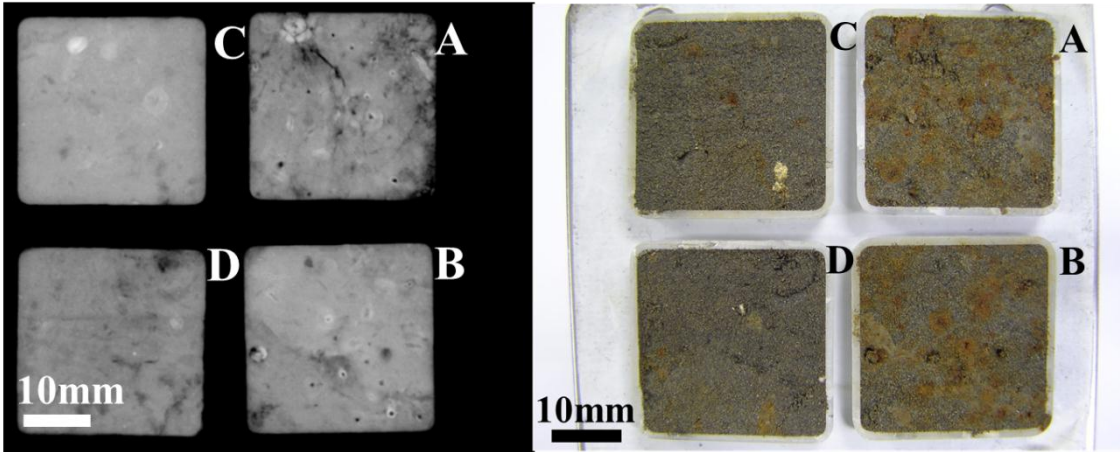
大山信雄，坂井弘(1971)：水管理による水田耕土の酸化還元状態の変化(第 2 報) 落水に伴う耕土の収縮と気相の生成との関係，日本土壤肥料学雑誌，第 42 卷，第 9 号，pp349-354

佐藤照男(1992)：八郎潟干拓地重粘質水田土の粗孔隙の発達とその意義，農業土木学会誌，第 60 卷，第 1 号，pp25-30

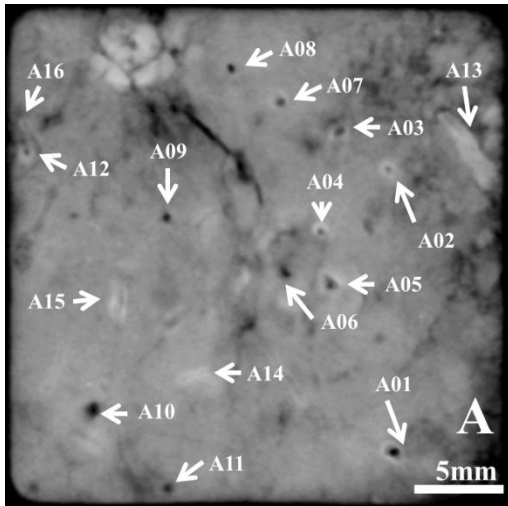
須藤俊男(1996)：コンクリーションおよび関連物中にみられる薄層組織の成因(I)，粘土科学，第 36 卷，第 2 号，pp86-99

高橋智紀(2012)：酸化還元研究の新展開 ー土壤の酸化還元がもたらす現象を追うー
5. 水田輪作での鉄の形態変化と土壤特性との関係，日本土壤肥料学雑誌，第 83 卷，第 6 号，pp714-720

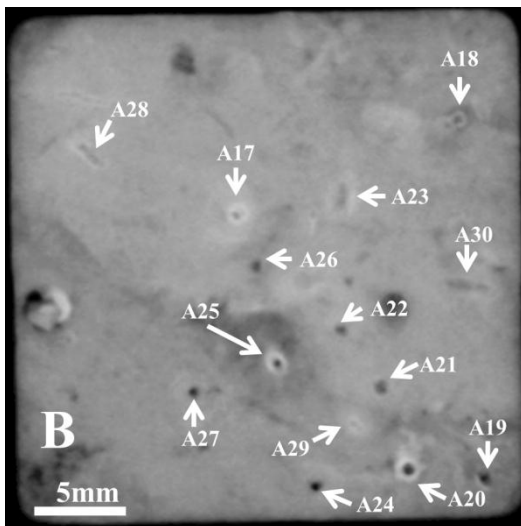
附録



試料写真と軟 X 線画像



面密度測定ポイント(試料 A)



面密度測定ポイント(試料 B)

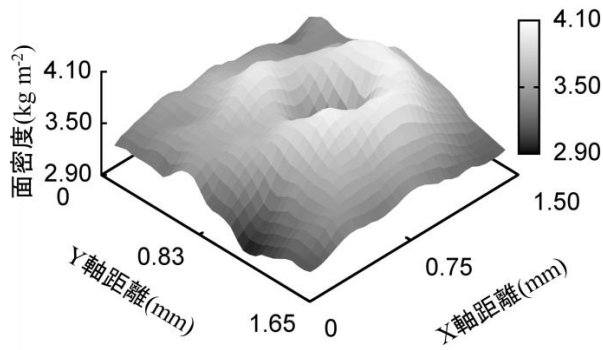


Fig. 1 A01 面密度 3D グラフ

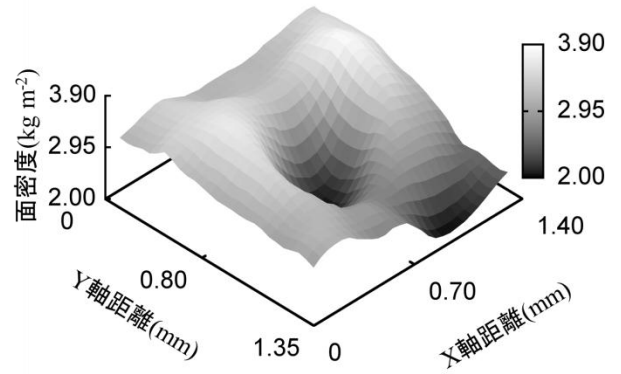


Fig. 2 A02 面密度 3D グラフ

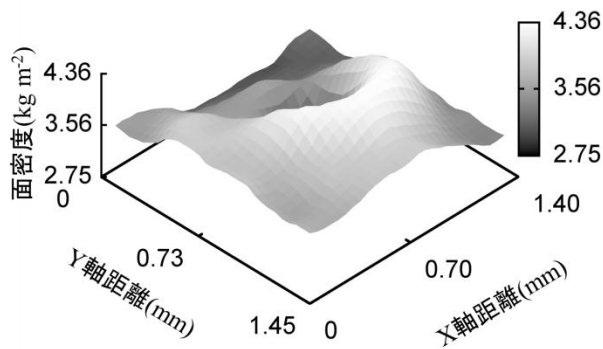


Fig. 3 A03 面密度 3D グラフ

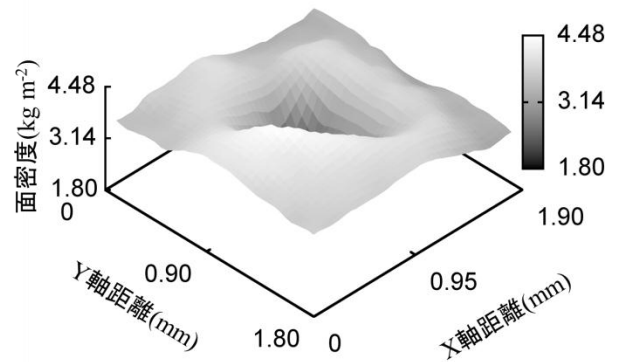


Fig. 4 A04 面密度 3D グラフ

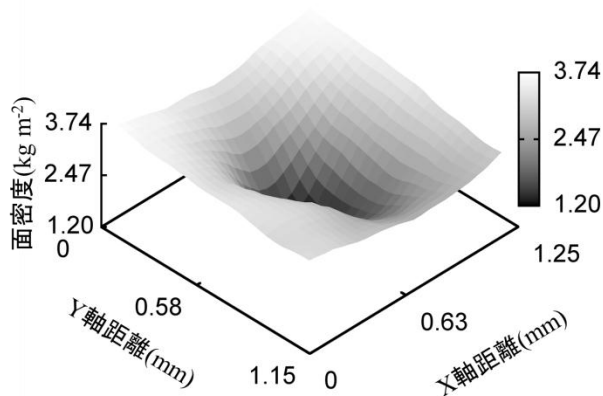


Fig. 5 A05 面密度 3D グラフ

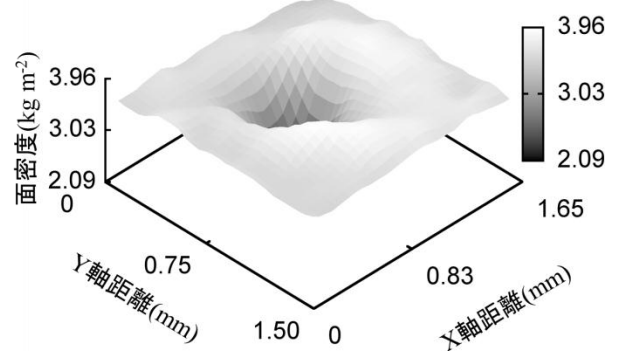


Fig. 6 A06 面密度 3D グラフ

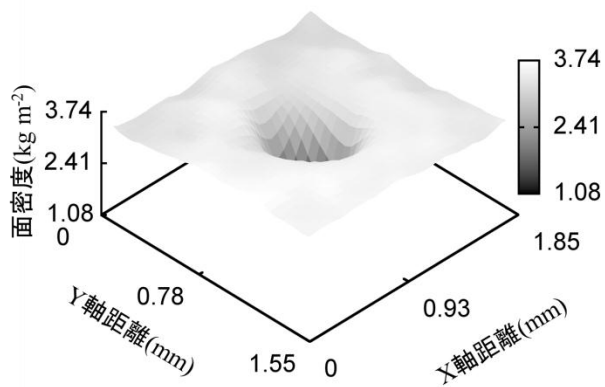


Fig. 7 A07 面密度 3D グラフ

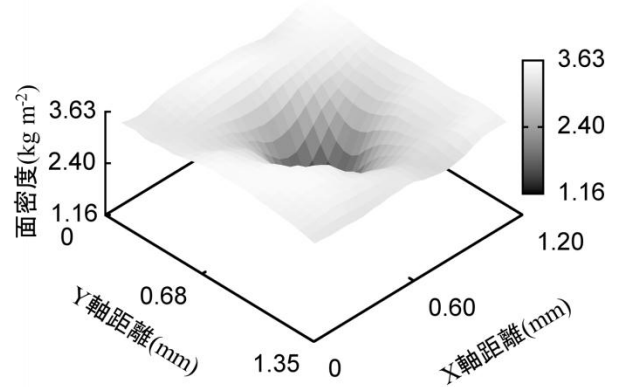


Fig. 8 A08 面密度 3D グラフ

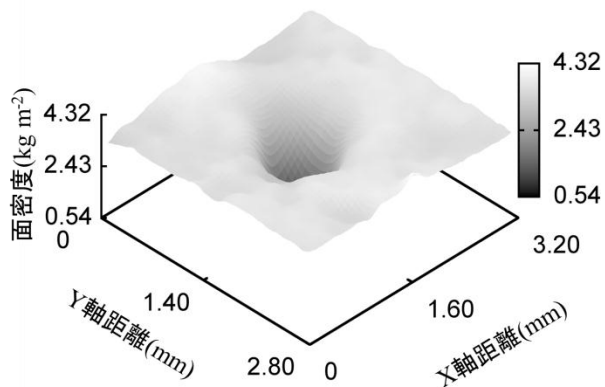


Fig. 9 A09 面密度 3D グラフ

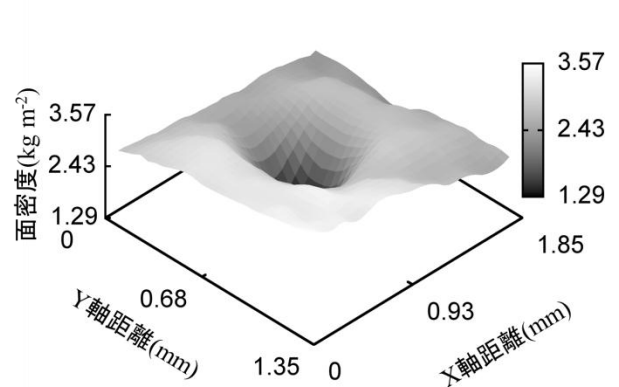


Fig. 10 A10 面密度 3D グラフ

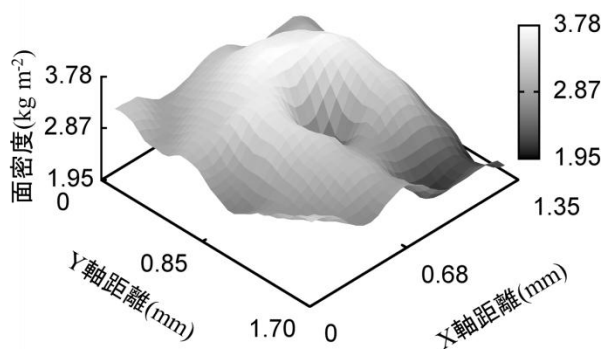


Fig. 11 A11 面密度 3D グラフ

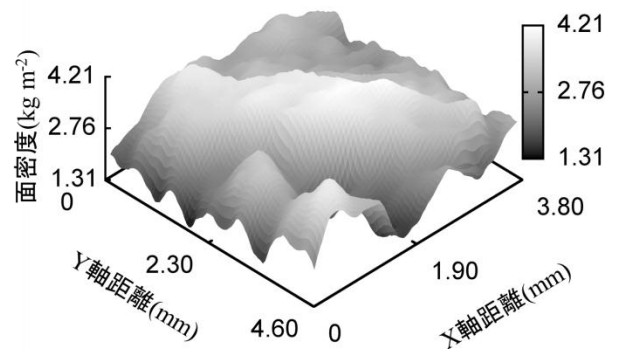


Fig. 12 A12 面密度 3D グラフ

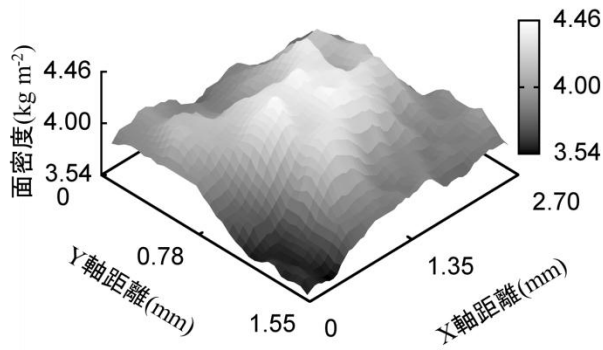


Fig. 13 A13 面密度 3D グラフ

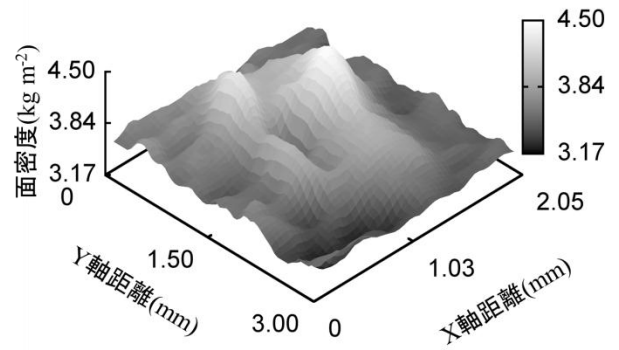


Fig. 14 A14 面密度 3D グラフ

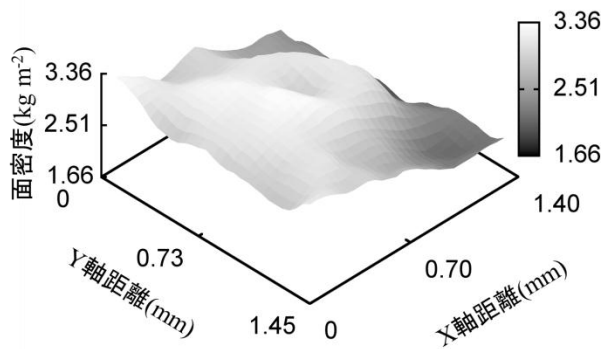


Fig. 15 A15 面密度 3D グラフ

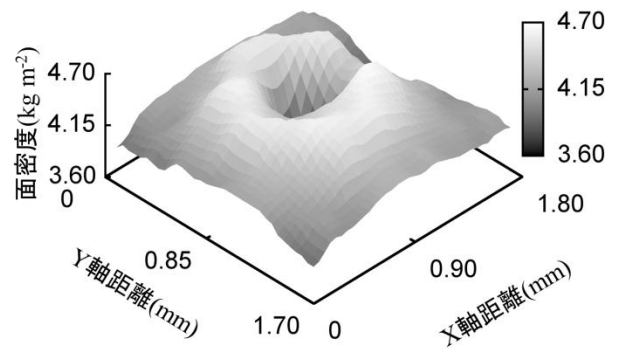


Fig. 16 A16 面密度 3D グラフ

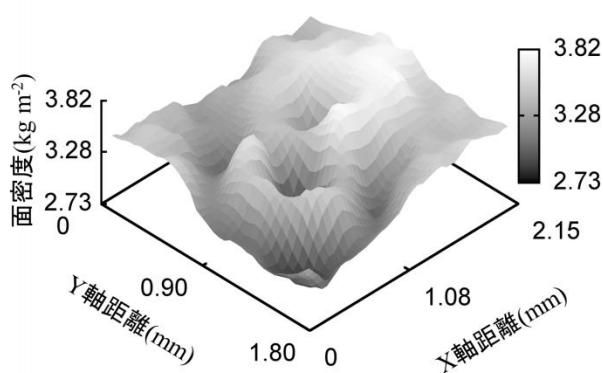


Fig. 17 A17 面密度 3D グラフ

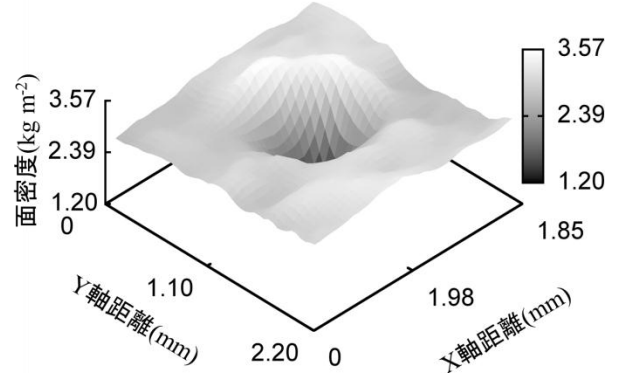


Fig. 18 A18 面密度 3D グラフ

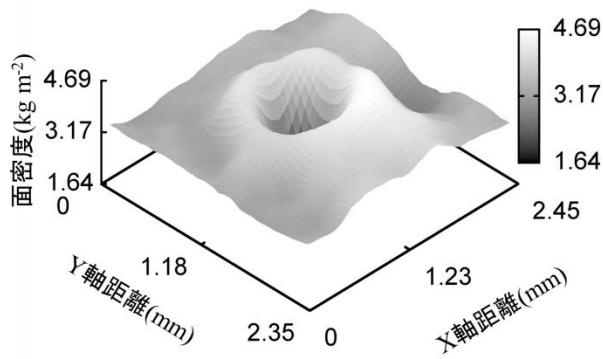


Fig. 19 A19 面密度 3D グラフ

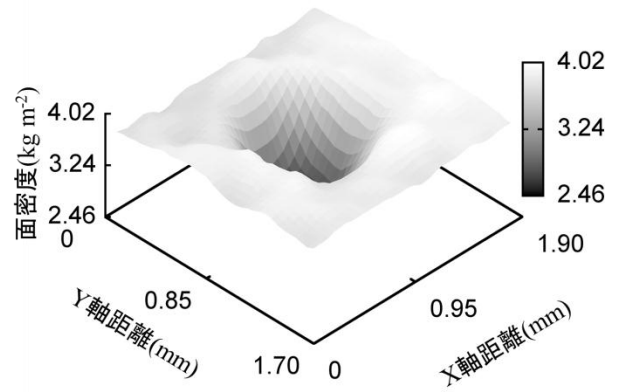


Fig. 20 A20 面密度 3D グラフ

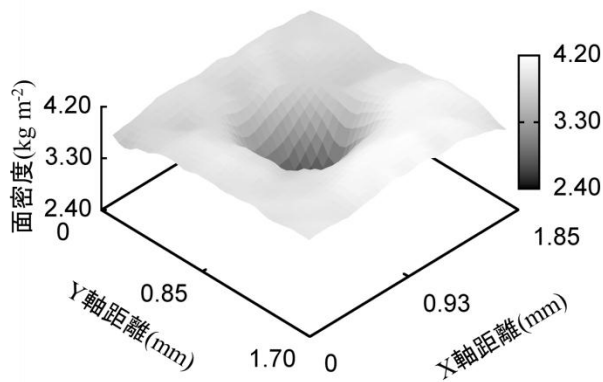


Fig. 21 A21 面密度 3D グラフ

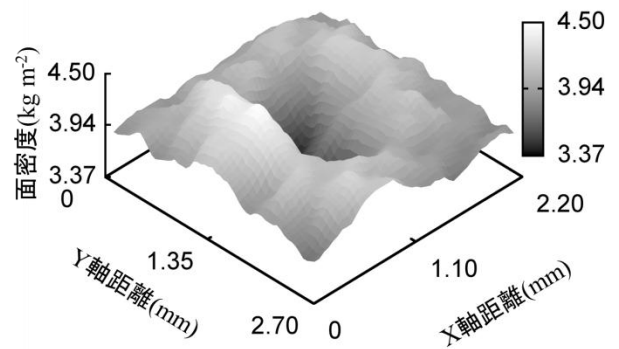


Fig. 22 A22 面密度 3D グラフ

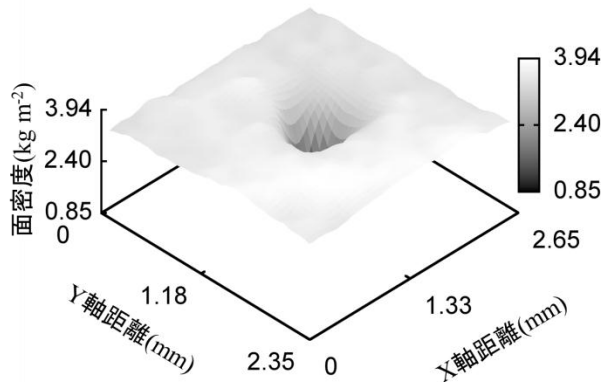


Fig. 23 A23 面密度 3D グラフ

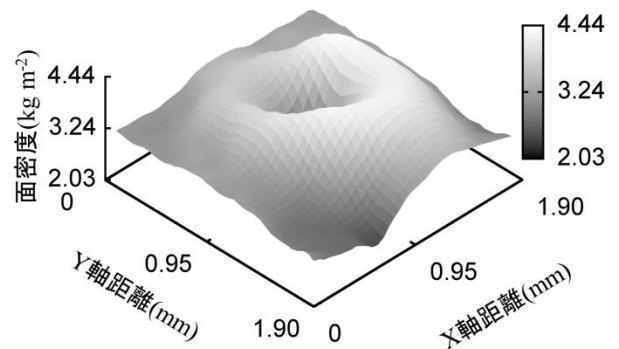


Fig. 24 A24 面密度 3D グラフ

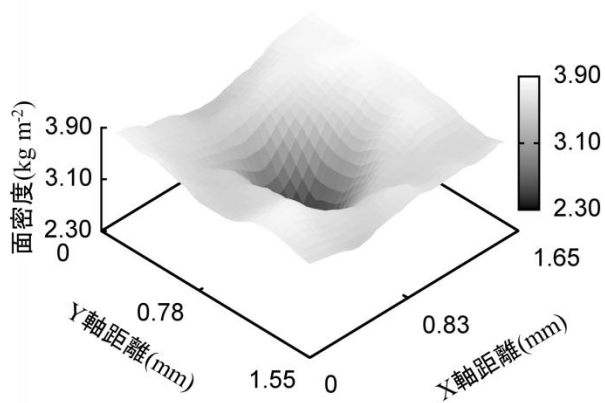


Fig. 25 A25 面密度 3D グラフ

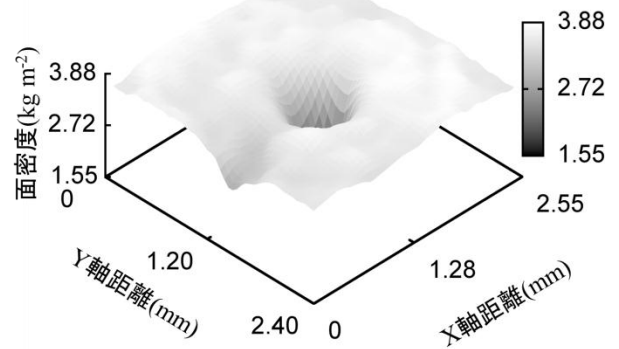


Fig. 26 A26 面密度 3D グラフ

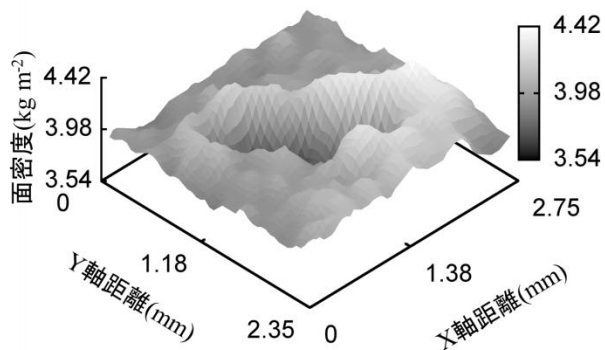


Fig. 27 A27 面密度 3D グラフ

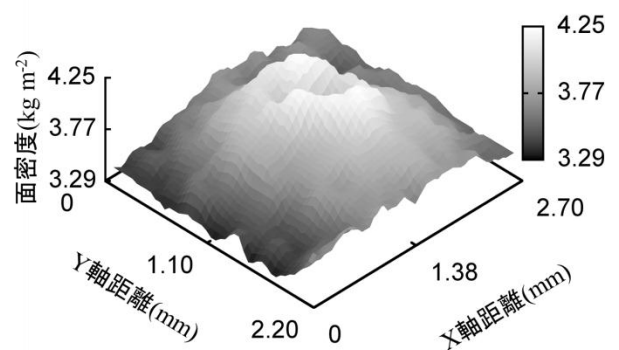


Fig. 28 A28 面密度 3D グラフ

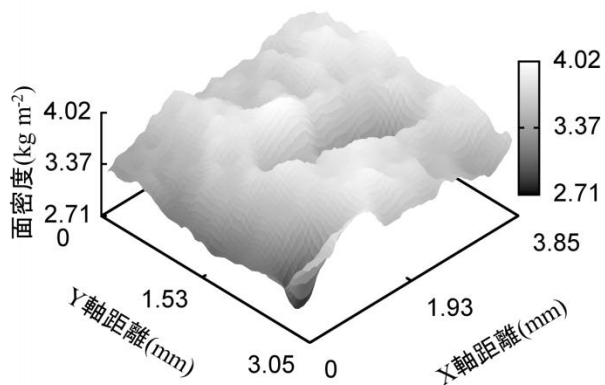


Fig. 29 A29 面密度 3D グラフ

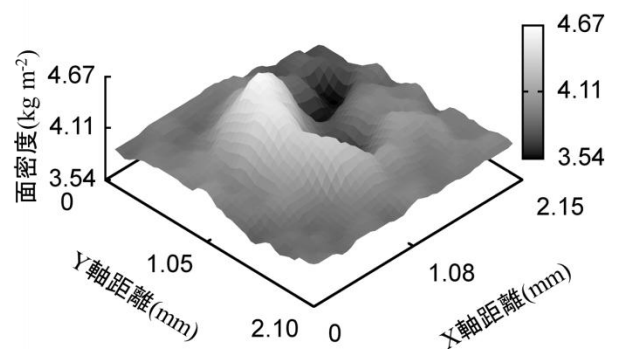


Fig. 30 A30 面密度 3D グラフ

干拓地水田の作土層および耕盤層における粗間隙の形成について

流域保全学分野 古谷 啓 (指導教員：成岡 市)

1. はじめに

わが国の農業形態は、従来の水田単作から、転換畑や田畑輪換などへ農地の利用方法が多様化してきている。また、土地の利用方法だけでなく、バイオマスエネルギーや生分解性プラスチックなど、農作物の利用方法も多様化している。環境問題やエネルギー問題といった食糧自給以外の役割を農業が果たす事も期待される。平地や干拓地などの大区画化しやすい農地の需要が大きくなると考えられている。

しかし、干拓地では、通常の農地にはみられない特徴がため、干拓地土壌での土層の変化や実態の解明は、農地の高度利用化にとってきわめて重要である。

成岡(1991)は、畑地や水田、転換畑、干拓地と種々の条件下の土壌を比べ、土壌物理的機能の違いを整理した。また、佐藤(1992)は、八郎潟の重粘土圃場の土層中の孔隙の連続性について論じた。しかし、八郎潟干拓地は、水田の土壌環境や栽培方法などについて、実態の解明は進んでいるが、有明干拓地のような砂質土壌の農地や、八郎潟干拓地以外の古くから行われた干拓地農地土壌の実態解明はあまり進んでいない。

本論では、砂質土壌の干拓地農地における、土層環境や鉛直方向の土壌物理的現象などを理解するため、基本的土壌物理性、透水性、限界間隙特性、pF水分特性、軟X線影像などの視点から干拓地土壌における粗間隙構造を理解し、土層ごとの粗間隙の接続性、土壌内物質の移動、および土壌内への大気進入に対する粗孔隙の意義について考察する。

2. 研究対象地

熊本県熊本市海路口町の干拓地農地(緯度：32.7277 度，経度：130.6166 度，標高-1.605m)で現地調査を行った。

この農地は、1800年代に干拓され、有明海に面しており、海拔は-2m以下の平坦な地形となっている。

熊本地域硝酸性窒素削減計画書(2005)によると、熊本地域は阿蘇火砕流堆積物が堆積した地質であり、透水性が高く、有害物質なども侵入しやすくなっている。加えて、熊本地域南東部の地下では、地質学的な割れ目が多く多孔質で水を透しやすい砥川溶岩が分布している。そのため、地下水を蓄える役割と、地下水を速やかに平野へ送る役割を同時に有している。

地下水の動態は、まず阿蘇外輪山西麓の山地・丘陵部で涵養され、地下水位分布の平坦な場所に流入する。熊本平野部に達した地下水は、東から西へ有明海に向かって緩やかに流れ、有明海へ流入している。

調査対象農地は、干拓当初は水田として利用されていたが、現在はトマト栽培農地となっている。

3. 研究方法

現地調査では、土壌断面調査および試料の採取を行った。採取した試料は、室内実験により、基本的土壌物理性(自然含水比，乾燥密度，土粒子密度，間隙率，塑性・液性，土性)，飽和透水係数，限界間隙特性，pF水分特性，軟X線撮影，土壌面密度の測定を行った。

(1) 土壌面密度の測定法

土壌面密度とは「土壌の単位面積あたりの固層の質量」として、次式のように定義される(廣住，2012)。

$$\rho_A = M_S/A_t \quad 1-1$$

ただし、 ρ_A ：土壌面密度(kg m^{-2})， M_S ：固相の質量(kg)， A_t ：面積(m^2)

土壌面密度 ρ_A は、ある平面範囲に含まれる固相の質量を示す値である。この面密度を縦軸に、

Table 1 各土層の基本的土壌物理性の結果

	土粒子密度 (Mgm ⁻³)	粒度分布(%)			塑性・液性			乾燥密度 (Mgm ⁻³)	間隙率 (%)
		砂	シルト	粘土	PL (%)	LL (%)	Ip		
I層 作土層	2.772	73.20	11.10	15.70	27	39	12	1.24	55
II層	2.759	75.40	11.00	13.60	24	38	14	1.25	55
III層 耕盤層	2.806	85.20	7.30	7.50	25	38	13	1.24	56
IV層	2.764	84.50	6.00	9.40	26	36	10	1.28	54
V層 心土層	2.748	85.10	6.90	8.10	28	30	2	1.22	56

Table 2 各土層の三相割合, 限界間隙, 透水係数

	三相割合(%)			限界負圧 開放間隙径(mm)		透水係数		
	固相	液相	気相	鉛直方向	水平方向	鉛直方向 (cm・s ⁻¹)	水平方向 (cm・s ⁻¹)	異方性 (K _H /K _V)
I層	45	43	12	0.115	0.231	9.E-07	7.E-06	7.95
II層	45	43	12	0.300	0.273	1.E-03	2.E-04	0.13
III層	44	45	11	0.200	0.088	6.E-05	2.E-04	3.17
IV層	46	48	6	0.429	0.375	1.E-03	2.E-04	0.15
V層	44	47	8	0.077		6.E-04	8.E-05	0.15

軟 X 線撮影で得た土壌試料影像の濃度階調値を横軸に取った検量線を作り, 軟 X 線撮影で得た不攪乱試料の軟 X 線影像を面密度で表現する。これにより, 微小面積の密度を測定することができる。

4. 結果と考察

調査した圃場の土層は, 「作土層, 耕盤層, 心土層」に分化していた。以下, 作土層および耕盤層について考察する。

土壌断面図を Fig. 1, 各土層の実験結果を Table 1~2 に各々示す。

4.1 作土層および耕盤層の構造

(1) 作土層(I層, II層)

① I層の構造

作土層の亀裂の深さは I 層内で留まっていた。つまり, 重粘土圃場の転換畑で起こる亀裂による耕盤層の破壊は, 調査圃場では起こっていなかった。また, II層では壁状の土層となっており, 亀裂構造は比較的もろい I 層で発達することがわかった。

透水係数では, 鉛直方向・水平方向どちらも難透水性であった。I層は連続した孔隙が見られず, 水は速やかに浸潤することができない。また, I層はほかの土層より粘土分が多く, 透水性の小さい土層であった。つまり, I層の水移動は, 亀裂を経路にする部分流が発生してい

ると考えた。

② II層の構造

II層では土層が壁状構造となっていた。これは畝立てなどによる耕起深さが I 層に限定されていると考えた。

透水係数は, 鉛直・水平方向どちらも I 層より大きい。これは, トマトの根などによって形成された管状孔隙が網目状に立体形成されているため, 透水や通気が良好な土層となっていると考えた。

つまり作土層は, 難透水性であり, 亀裂以外の間隙が少ない I 層と, 良透水性で作物根によって形成された管状孔隙が多い II 層によって成していると理解した。

(2) 耕盤層(III層)

① III層の構造

耕盤層は, 明瞭な壁状構造となっており, 立体的な間隙の繋がりが少ない構造である。

透水係数については, 鉛直方向に対して水平方向の方が高かった。

しかし, III層においては, 亀裂はほとんど視認できなかった。つまり亀裂は, 水平方向の透水性についての役割を果たしているのではなく, 亀裂が形成されることによって, 管状孔隙と接続する面積を増大させる役割があると考えた。

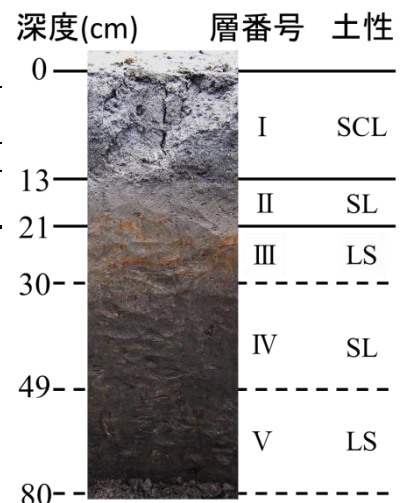


Fig.1 土壌断面図

また、鉛直方向の管状孔隙の周りには斑鉄形成が見られた。したがって、この管状孔隙は水稲湛水栽培を行う水田期間に形成された孔隙と推定した。

転換畑では通常、暗渠管まで亀裂が伸び、耕盤層を破壊することがある。この調査農地では亀裂が耕盤層到達していなかった。

山中式土壌硬度は27mmであり、根の伸長制限値の25mmを超えていた。したがって、心土層まで根が伸長することは困難であると考えた。

しかし、本調査では、大小さまざまな管状孔隙が斑鉄形成を伴って保存されており、それが孔隙を通り心土層まで達していたと考えた。

② 斑鉄形成

斑鉄形成によって保存された管状孔隙は、土壌面密度の分析結果からも理解できる(Fig. 2, Fig. 3)。

面密度の3Dグラフ(Fig. 2)では、孔隙辺縁部の密度が大きくなり、斑鉄部分の密度が高くなっていた。この特徴は、斑鉄が形成した管状孔隙のみに現れ、斑鉄が形成していない管状孔隙ではこのような盛り上がりはなかった。

面密度断面グラフ(Fig. 3)より、真円に近い斑鉄形成をなした孔隙について、孔隙径の大小にかかわらず孔隙の辺縁から200~300 μm 基質側に入った位置に密度のピークが現れることが分かった。

このことより、斑鉄が形成された管状孔隙の強度は斑鉄形成が無い管状孔隙より高くなっていることがわかった。そして、鉄の沈殿集積が起こっている位置が、孔隙の辺縁から200~300 μm 基質側に入っているため、孔隙強度が高くなることがわかった。

以上のことから、耕盤層は根が伸長困難な硬度であり、亀裂形成された跡も無い壁状構造の層となっているが、斑鉄形成を伴う管状孔隙により、鉛直方向への速やかな通気・透水が発生している層となっていた。

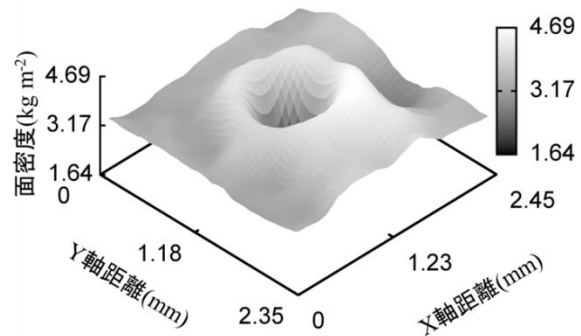


Fig. 2 管状孔隙の面密度 3D グラフ(斑鉄有り)

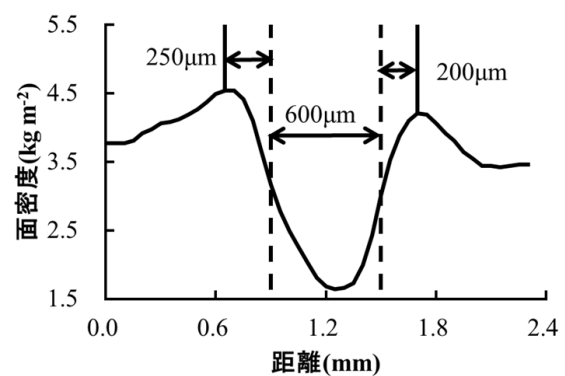


Fig. 3 管状孔隙の面密度断面グラフ(斑鉄有り)

4.2 作土層表層の亀裂の特性

表層の土性は砂質埴壤土であった。表土の亀裂は15cmほどの深さになり、亀裂で囲まれた表土の平均面積は653.8 cm^2 であった。

亀裂には、交角がほぼ90度で、T字型に発生するという特徴があった。

伊藤ら(1988)は、ベントナイトに砂を混合すると、砂分が多くなるにつれて、亀裂の交角が大きくなり、Y字型に発生することを示している。また、試料総質量の40%を砂が占めるようになると、亀裂が明瞭に入らないと報告している。

しかし、この圃場では、砂分が70%以上含まれる土壌であるにも関わらず、明瞭な亀裂形成が見られた。伊藤らは、試料に厚みがあると、収縮による亀裂幅は大きくなると示している。また、同じ干拓地でも重粘土圃場である八郎潟干拓地の亀裂は、30cm~45cmの深さまで入ることがある(農業土木学会, 1972)。

Table 3 各土層での間隙の特徴

層番号	採土方向	pF水分分布曲線の特徴	軟X線画像の特徴	開放間隙量の特徴
I層	鉛直	細間隙が多い	土壌は壁状構造, 粗間隙形成無し	一定量
	水平		土壌は壁状構造, 粗間隙形成有り	上部→下部にかけて減
II層	鉛直	粗間隙が多い	管状孔隙が卓越	一定量
	水平		粗間隙形成に富む	
III層	鉛直	細間隙, 粗間隙は同量のピーク	土壌は壁状構造, 管状孔隙に富む(点状)	一定量
	水平		土壌は壁状構造, 管状孔隙に富む(線状)	
IV層	鉛直	細間隙が多い	土壌は壁状構造, 管状孔隙に富む(点状, 線状)	上部→下部にかけて減
	水平			
V層	鉛直	間隙径0.01mmのピーク以外は同量	土壌は壁状構造, 管状孔隙有り(点状, 線状)	一定量
	水平			

このことから、重粘土圃場にみられるような大規模な収縮が起こらない理由は、砂分が多いことにより、作土層表層の粘土の収縮量が抑えられたことと考えた。そのため、耕盤層に至るほどの亀裂は発生しなかったものと考えた。

4.3 粗間隙の形成

上述の各土層の特徴および考察より、調査圃場の各土層の間隙モデルを Fig. 4 に示した。また、各土層の間隙の特徴を Table 3 に示した。

(1) I層(作土層上層)の間隙構造

I層の間隙は、乾燥亀裂のみが発達し、土壌自体は単粒構造となっていた。

調査圃場では、トマト栽培の後、畝を戻し、圃場を一か月半湛水し、その後水抜きを行っている。土壌が乾燥し、一定の地耐力を得たら再度耕耘している。そのため、湛水後の表土は土壌構造が単粒化していると考えた。発生した亀裂は、通気、透水の経路となる。

(2) II層(作土層下層)の間隙構造

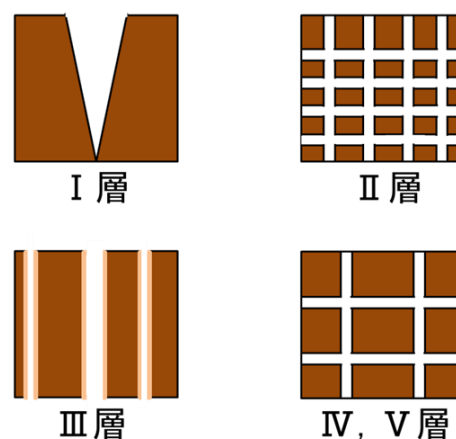
II層の間隙構造は、粗孔隙形成が明瞭で、粗孔隙が立体的な広がりを持ち、速やかな排水を促している層となっていた。

II層の間隙構造は、トマトの根によって形成された管状孔隙が主体と考えた。III層は堅い土層のため、根は水平方向へ伸長する層であった。

そのため、縦横のつながりを持った立体的な管状孔隙が、通気、透水の経路となっている。

(3) III層(耕盤層)の間隙構造

III層の間隙構造は、鉛直方向の大小様々な管状孔隙が斑鉄により保存された構造となっていた。



凡例 亀裂 管状孔隙 斑鉄形成した管状孔隙

Fig. 4 各土層の間隙モデル

斑鉄により保存されている間隙径が 1mm 以上のものもあった。そのため、排水性が良く、心土層に根が伸長するときに、1mm ほどの孔隙が主経路となっていた。

つまり、間隙径によって、水・大気の移動、根の伸長に関わる役割が異なり、圃場の物質移動、作物成長に対して重要な影響を与えている。

(4) IV層, V層(心土層)の間隙構造

IV, V層の間隙構造は、心土へ伸長したトマトの根によって形成された管状孔隙が存在する構造となっていた。

IV層は、耕盤層直下の土層であるため、根の広がりは良く、II層ほどではないが鉛直・水平方向の物質移動は容易に行えるものと考えた。

V層は、鉛直方向への根の伸長はあるものの、水平方向の伸長は乏しいため、間隙構造は鉛直方向の孔隙が水平方向の孔隙より多くなっていた。しかし、全体的に孔隙数は少なく、壁状

構造になっていた。

つまり、根の伸長はV層付近で少なくなり、これ以深で根が伸びているとは考えにくい。そのため、水平・鉛直方向の間隙のつながりは不明瞭となっていると考えた。

4.4 各土層の亀裂および管状孔隙の接続性

以上のことから、I層～V層までの鉛直方向の間隙の接続性をまとめるため、接続性の模式図をFig. 5～6に各々示した。

(1) I層(作土層上部)での間隙の接続性

I層は、湛水下では亀裂が発生しないため、浸透による水移動が主体となる。表層の排水性は低く、II層目との接続性も少ない。しかし、湛水が止まり、表面に亀裂が入ると、II層へ速やかに通気・透水が発生する。

(2) II層(作土層下部)での間隙の接続性

II層では水平・鉛直方向への通気性や透水性が大きい。

そのため、II層の間隙を通過する水や大気は、III層に到達すると水平方向に向かい、III層の通気・透水の主体となる管状孔隙と連絡している。

(3) III層(耕盤層)での間隙の接続性

III層では、管状孔隙が鉛直方向に伸長しているため、鉛直方向への移動が容易に行われている。

管状孔隙の外側に斑鉄が形成されているため、速やかに下層へ物質移動が行われている。

つまり、耕盤層を有して通気、透水の経路を保存しているため、作土層と心土層をつなぐ重要な役割を果たしている。

(4) IV層、V層(心土層)での間隙の接続性

IV層では、管状孔隙の広がりII層ほどではないが大きくなるため、水や大気の水・鉛直方向への移動が容易となっている。III層の間隙との接続性も強い。

V層では、管状孔隙の広がりが少なく、水や大気の水・鉛直方向への移動が主体となる。IV層から伸びた根がV層の管状孔隙を作り、IV層の間隙との接続性を高めている。

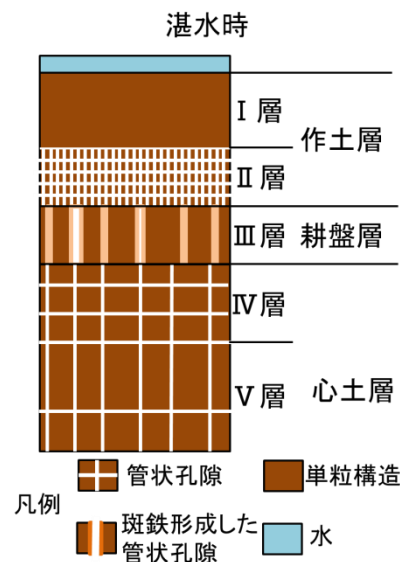


Fig. 5 湛水時の間隙構造

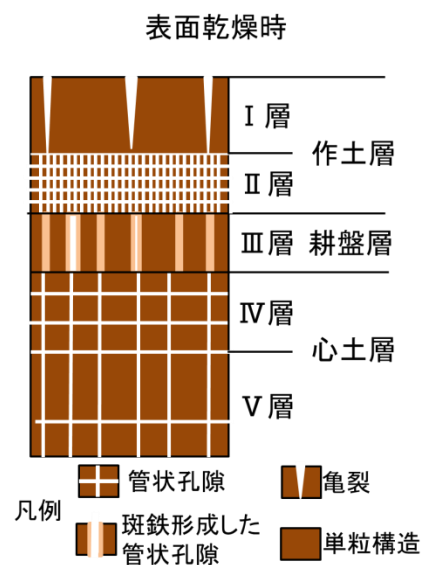


Fig. 6 表面乾燥時の間隙構造

このように、I層が湛水されている間は、I層で水の浸透があるが、大気の進入は無い。I層目に亀裂が入り、II層目と亀裂が接続された後は、比較的速やかに大気の進入が行われると考えた。

特に、鉛直・水平への水移動が速やかなII層、IV層の間は、保存・強化された孔隙が耕盤層にあるため、作土層と心土層の接続が保たれ、圃場全体の鉛直方向への物質移動に重要な役割を果たしている。

4.5 地下水位の変動による粗間隙の影響

調査地(干拓地)に隣接する有明海は、潮汐に

よる潮位差が大きい。調査地では平均潮差はおよそ2~3mである。この潮汐により地下水位の変動が起こり、粗間隙内に負圧がかかる。

そのため、引き潮時と上げ潮時での粗間隙の影響を考察した。また、引き潮時、上げ潮時による影響を Fig. 7~8 に示した。

(1) 下げ潮時

引き潮により海面が後退し、地下水位が深くなる。そのため、土壤に負圧がかかり、孔隙を通して下方への水移動が行われる。

圃場が湛水状態であれば、地表面から土壤内への大気進入は無く、水分移動のみが発生する。つまり、湛水時期による下げ潮は、湛水状態で分解される有機物から生成した栄養塩や、還元状況下で生成するガス成分が土壤水中に溶け込み、さらに負圧の働きにより下方へ移動する。

潮汐変動は、一日に2周期あり、一度の引き潮により土壤中にかかる負圧が平衡する前に、上げ潮へ移行すると考えられる。そのため、引き潮・上げ潮を繰り返し、徐々に下方への水移動が促進されている。

これにより、表層部の過剰な栄養塩の蓄積を止めることができ、ガス生成の原因物質や、作物にストレスを与える物質の排除の役割も持っている。

圃場表面に亀裂が入っている状態であれば、水の移動と同時に大気進入も始まる。そのため、酸化状態となる土層では、窒素固定のような、溶脱していた栄養塩が無機物として土壤に固定される場合がある。

(2) 上げ潮時

上げ潮により海面が上昇することで、地下水位が浅くなり、毛管上昇により上方への水移動が行われる。

そのため、熊本平野から流れてきた地下水と海水が混ざった汽水の水位が上昇し、根に対する塩ストレスがかかりやすくなる。また、地下水による、ミネラル分の作土層への補給も発生していると考えた。

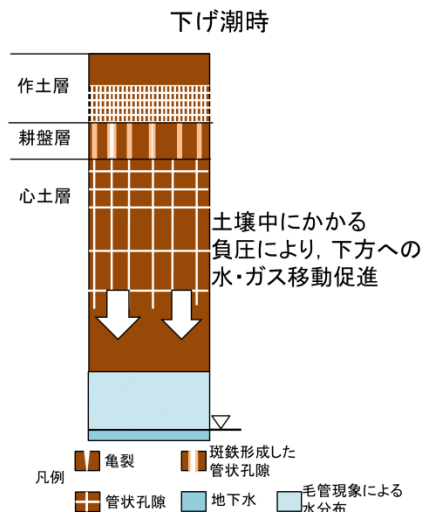


Fig. 7 下げ潮時の水分ガス移動

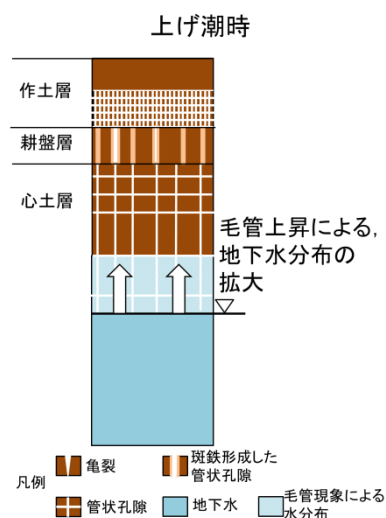


Fig. 8 上げ潮時の水分・ガス移動

5. おわりに

本論は、砂質土壤の干拓地の土壤構造の解明を目的として、土壤物理性、管状孔隙の形成・接続性の面から考察した。

その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 重粘土圃場で起こる亀裂による耕盤層の破壊により、心土層への大気疎通が砂質土壤干拓地では起こらない。
- (2) 耕盤層の斑鉄形成により保存された管状孔隙により、作土層と心土層の物質移動に関わる接続性が保たれる。
- (3) 鉛直方向の間隙の接続性が保たれることによって、地下水位変動による、水分・ガス移動の促進が行われる。