

農地の物理的構造と機能発現

— 農地に対する農業土木的視点 —

(株)イーエス総合研究所

相馬 尅之
長澤 善明
常松 哲

1. はじめに

農業は作物の有機物合成能力を利用した食料生産を生業であるから、生産ラインとなる作物生育の場「農地（土壌）」の管理は生産性を持続していく上で極めて重要である。そのため恒常的な耕耘管理や肥培管理、一時的な土層改良（土壌物理性の改善）や土壌改良（土壌化学性の改善）など諸々の管理が行われているところである。しかし、大型農業機械を用いる北海道の畑地では、慣行的な耕耘管理がむしろ物理的機能の適正発現を阻害する事例が多く見受けられ^{1)~2)}、また近年の局所的な集中豪雨に由来する畑地の湿害の多発化も相まって依然として畑地の排水不良が問題視される状況を見たとき、土壌管理の見直しが必要であることを痛感する次第である。

ところで作物による有機物合成の工程は、根系による吸水・輸送と、茎葉部における光合成による有機物の合成から成り立っている。有機物合成に不可欠な水を効果的に確保するために作物は根張りによって根群域を拡大し、根系の骨格を築く主根と、主根から派生して吸水代謝を担う分枝根から成る根系を形成する。根張りや主根による茎葉部への水輸送におけるエネルギーは呼吸代謝でまかなわれるため、根群域土壌には水とともに空気が常に存在する「水と空気の共存状態」が求められる。

作物の根系が活動する場が土壌中の「間隙」であり、農地土壌は一般に団粒構造に由来する「団粒間隙」と「団粒内間隙」で構成される間隙組成をもち、しかも両者は相互に連通している。団粒間隙が

「排水機能（水はけ）」を、また団粒内間隙が「保水機能（水もち）」の物理的機能を発現することによってそれぞれの間隙中に「空気」もしくは「水」が確保され、「水と空気の共存状態」が創出されることになる（図1参照）。

このことにより、作物の主根は空気が確保されている団粒間隙を、また分枝根は利用可能な水が確保されている団粒内間隙を代謝活動の場として、作物生育（有機物合成）を担っていけるのである。従

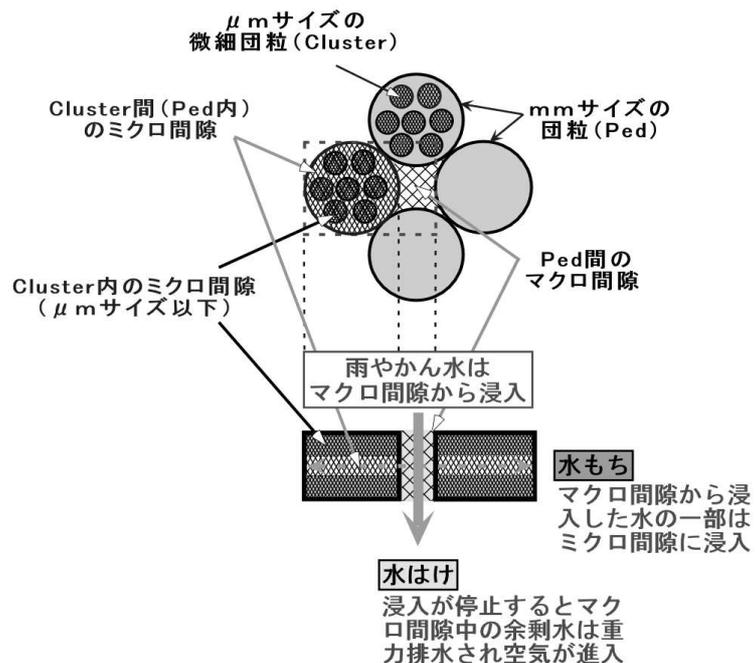


図1 団粒構造に由来する間隙組成と物理的機能

って作物生産におけるライン管理として位置づけられる土壌管理では、土壌の物理的機能の適正発現を通じて常に「水と空気の共存状態」を維持することが管理目標になり、そのためには物理的機能の発現状況を規定する農地の物理的構造²⁾の現状把握と修復・保全が不可欠であると言える。

本報告は、農地の物理的構造が物理的機能の発現を規定するという視点に基づき、物理的構造の適正化に向けた土壌管理の考え方と具体的な方法について述べたものである。

2. 農地の物理的構造の諸指標

十勝地域の黒ボク土畑について、物理的構造の一例を図2に示す。農地の物理的構造とは、間隙組成や（現場）含水比、飽和度、飽和透水係数、乾燥密度などを指標に用いて、土層構成に対応した物理的機能の発現状況を示したものである²⁾。

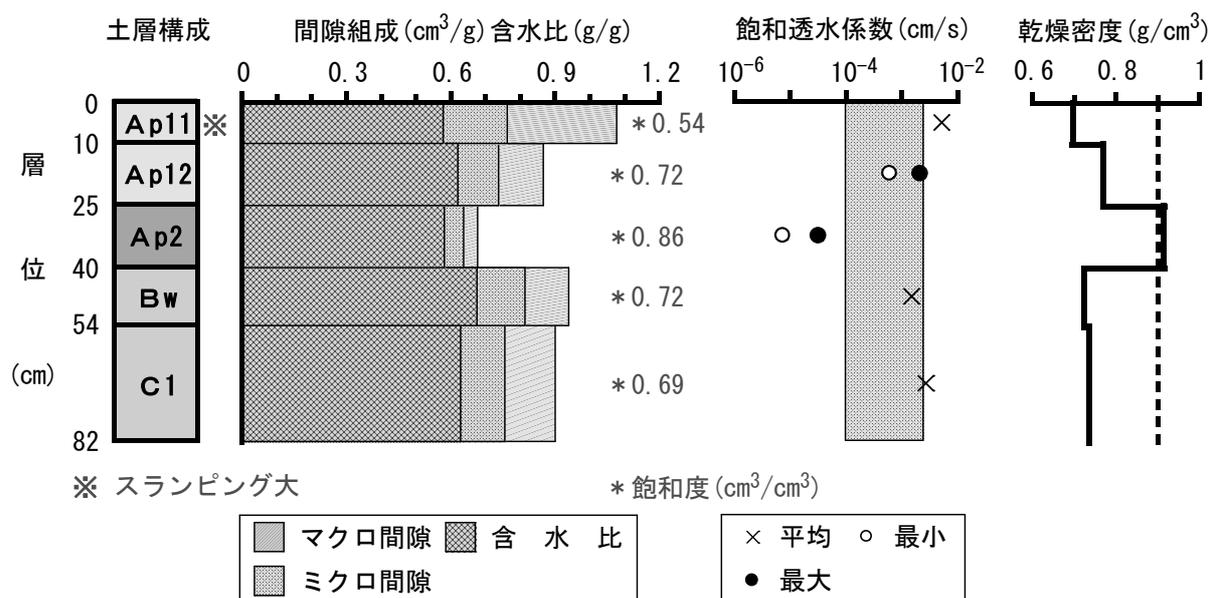


図2 十勝地域の黒ボク土畑の物理的構造

図2において「間隙組成」とは、飽和含水比から算出される間隙量 (V_p/M_s) を24時間容水量³⁾によって区分したマクロ間隙とミクロ間隙の構成状態のことである (V_p は土壌間隙の体積、 M_s は土壌マトリクスの質量)。重力排水終了時の水分状態「24時間容水量」で出現する空気間隙を「マクロ間隙」、残りを「ミクロ間隙」と規定するが、それぞれ上述の「団粒間隙」、「団粒内間隙」に対応し、マクロ間隙は物理的機能「水はけ」、ミクロ間隙は「水もち」の発現を担っている。(ミクロ)間隙に保持されている水の割合を表す「飽和度」は水分状態の良否を判定する指標であり、「水と空気の共存状態」が維持されている場合(良好な水分状態)、飽和度は $0.5 \sim 0.9 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ となる。飽和度 $0.9 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上は水はけ不良による過湿状態、また飽和度 $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下はミクロ間隙中の(易)有効水分がほとんど失われた水分状態と判定される。「飽和透水係数」は土壌の水はけの指標であり、畑地では重力排水後24時間以内に根群域のマクロ間隙に空気が侵入する水はけの発現が求められることから、指標となる飽和透水係数の適正範囲を $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ と規定した。飽和透水係数 10^{-5} cm/s のオーダー以下は水はけ不良、逆に 10^{-2} cm/s のオー

ダー以上は砂に匹敵する水はけの発現がむしろ水もちを阻害すると判定する。団粒構造の緻密度を表す「乾燥密度」は間隙量とは逆相関関係にあり、適正な水はけの発現に必要なマクロ間隙量が土壌によらずほぼ一定であることから（後述）、ミクロ間隙量に対しても逆相関関係が得られる。例えば土粒子の密度を 2.65g/cm^3 と仮定した場合、乾燥密度 $\leq 0.9\text{g/cm}^3$ （間隙量 $\geq 0.75\text{cm}^3/\text{g}$ ）の土壌は、 $V_p \geq 2 * V_s$ で間隙量が多く、水もちが高い土壌（例えば黒ボク土）と判定される（ V_s は土壌マトリクスの体積）。これに対して、乾燥密度 $\geq 1.3\text{g/cm}^3$ （間隙量 $\leq 0.38\text{cm}^3/\text{g}$ ）の土壌は、 $V_p \leq V_s$ で間隙量が少なく、水もちが低い土壌（例えば重粘土や砂質土）と判定される。

図3は水はけの指標である飽和透水係数とマクロ間隙量の関連性を示したものであり、マクロ間隙量の増加に伴い飽和透水係数も増大していくが、マクロ間隙量 $0.2\text{cm}^3/\text{g}$ 以上で砂に匹敵する飽和透水係数 $3 * 10^{-3} \sim 3 * 10^{-2}\text{cm/s}$ の範囲に収まる。

図3において、上述の飽和透水係数の適正範囲に対応するマクロ間隙量を求めると、間隙量によらず $0.05 \sim 0.15\text{cm}^3/\text{g}$ になる。言い換えると、農地土壌が適正な水はけを発現するためには $0.05 \sim 0.15\text{cm}^3/\text{g}$ のマクロ間隙量が必要であるということである。一方、水はけの指標となるミクロ間隙量は24時間容水量から算出されるが、間隙量の増加に伴って増えるものの³⁾、（易）有効水分を保持するミクロ間隙は多くてもミクロ間隙全体の30%程度に過ぎないことが伺える（図4参照）。このことは、作物による有機物合成に不可欠な水を確保するためには根張りによる吸水域の拡大が必要であり、根張りによる根群域の拡大を促す水はけの適正発現が重要であることを示唆している。

3. 北海道の畑地の物理的構造の問題点と対策

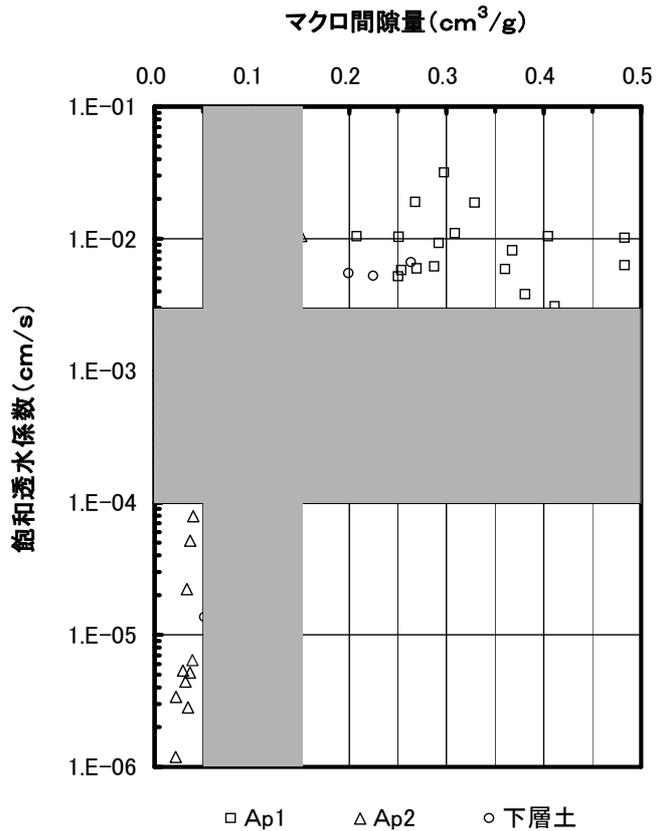


図3 飽和透水係数とマクロ間隙の関連性

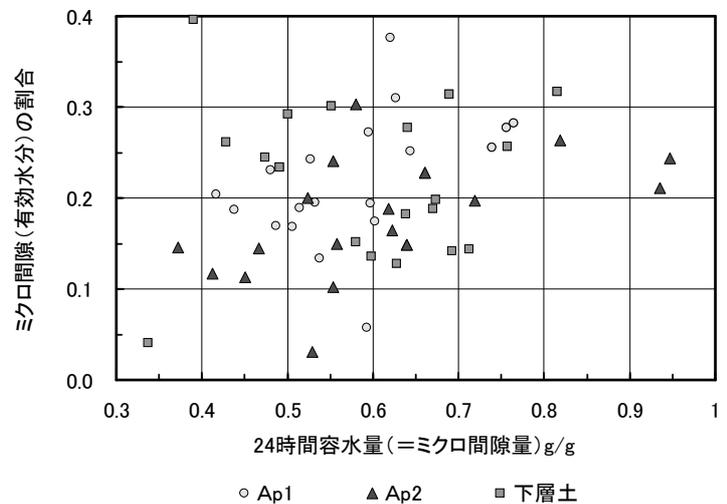


図4 有効水分を保持するミクロ間隙の割合

1) 慣行的な耕耘管理に起因する北海道の畑地の物理的構造

農地における収穫までの一連の営農管理は、前作の収穫残渣処理に始まり耕耘管理、肥培管理、播種（定植）、栽培管理（主として防除）、収穫と続いていく。これらのうち物理的構造とりわけ間隙組成の大きな変動をもたらす工程としては、収穫残渣処理と耕耘管理、栽培管理などがあげられ、収穫残渣処理と耕耘管理では攪拌作用によって間隙が一時的に増加するのに対して、栽培管理ではほとんどが農業機械の踏圧に起因する土壌圧縮により間隙が縮小する変化となる。

前作における営農管理を通じて変動した表層土の物理的構造を播種（定植）に適した状態に再構成することが耕耘管理であり、これによって物理的機能の適正発現が促され、良好な発芽（活着）に続く生育が保障されるはずである。しかし北海道の畑作で一般に行われている耕耘管理「プラウ反転耕起・ロータリ攪拌砕土」は、耕起（切削・分割）と砕土（破碎）を通じて土壌の団粒構造の破壊が不可逆的に進行する「過剰耕耘」に近く、当初の目的が達成されていない場面が多くみられる⁴⁾。

耕耘管理が繰り返される農地土壌の場合、表層の耕耘管理土層（Ap層）から不連続的に下層土に移行する土層構成となり、下層土は耕耘管理の際の耕深によって異なるが土壌生成に由来するB層やC層であることが多い。前出の図2の物理的構造をみると、慣行的な耕耘管理の影響を受けてAp層はAp1層（厳密にはAp11層とAp12層）とAp2層に土層分化している^{1)~2)}。Ap層が土層分化する過程は、プラウ反転耕起により深度40cmまでのAp層が反転置換された後、図2の圃場では2段階の攪拌砕土（ロータリハローおよびパワーハロー）によってAp2層（プラウ耕深）、Ap12層（ロータリーハロー）、Ap11層（パワーハロー耕深）の順に土層区分が進行する流れとなっている。

物理的構造の主要な指標「間隙組成」をみると、Ap11層はマクロ間隙が非常に多いのに対してAp2層は逆にマクロ間隙が極端に少なくなっている。しかし、含水比はAp11層から下層土C1層までほぼ同じである。

Ap2層は、水はけの指標である飽和透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ のオーダーの難透水性を示し、また団粒構造の緻密度の指標である乾燥密度が黒ボク土の上限 0.9 g/cm^3 を超えており、いわゆる難透水性の耕盤層と化している。このAp2層は、耕耘管理後にマクロ間隙が著しく増加したAp1層がその後の営農管理の過程で農業機械の踏圧による土壌圧縮を受けて堅密層になり、後作の耕耘管理の際のプラウ反転耕起によって反転置換されAp層内の下側に保存されたものである。図2のAp11層は、使用する農業機械が変わらなければ営農管理の過程でAp2層と同程度にまで圧縮され（後述）、収穫段階では難透水性の耕盤層「Ap2層」の上にこの新たに圧縮された「Ap11層」が重なるため、Ap層全体が堅密土層になる。この状況を農業機械の大型化に伴う「耕盤層の拡大」と捉えた向きもあったが、農業機械の大型化とは無関係の、慣行的な耕耘管理に良くみられる現象に過ぎない。

農地における農業機械の踏圧に起因する土壌圧縮は避けられない問題ではあるが、とりわけ攪拌砕土により膨軟化した土層で顕著である。図5は、網走地域の黒ボク土畑の土壌の圧縮性を示したものである。

土壌圧縮は団粒構造の強度に相当する先行圧縮応力を超える载荷で発生するが、農地における発生源は農業機械の踏圧である。また農地で起こる圧縮形態は一般に「締固め」で

あるから、縮少する間隙は「マクロ間隙」である。耕耘管理の影響を受けていない下層土の場合（マクロ間隙量 $0.09\text{cm}^3/\text{g}$ ）、圧縮曲線（間隙量～圧縮応力関係）は $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の载荷で圧縮が起こるのに対して、過度の碎土によりマクロ間隙が著しく増加したAp1層（マクロ間隙量 $0.26\text{cm}^3/\text{g}$ ）の圧縮は、 $0.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の非常に小さな応力で開始する。すなわち、過度の碎土による膨軟化は団粒構造の強度低下を招き、土壌の圧縮性を著しく増大させることになる。耕盤層「Ap2層（マクロ間隙量 $0.03\text{cm}^3/\text{g}$ ）」の前身は前作の営農管理で圧縮されたAp1層であるが、応力 $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の载荷で圧縮が始まっていることから、当該圃場で発生する圧縮応力は2

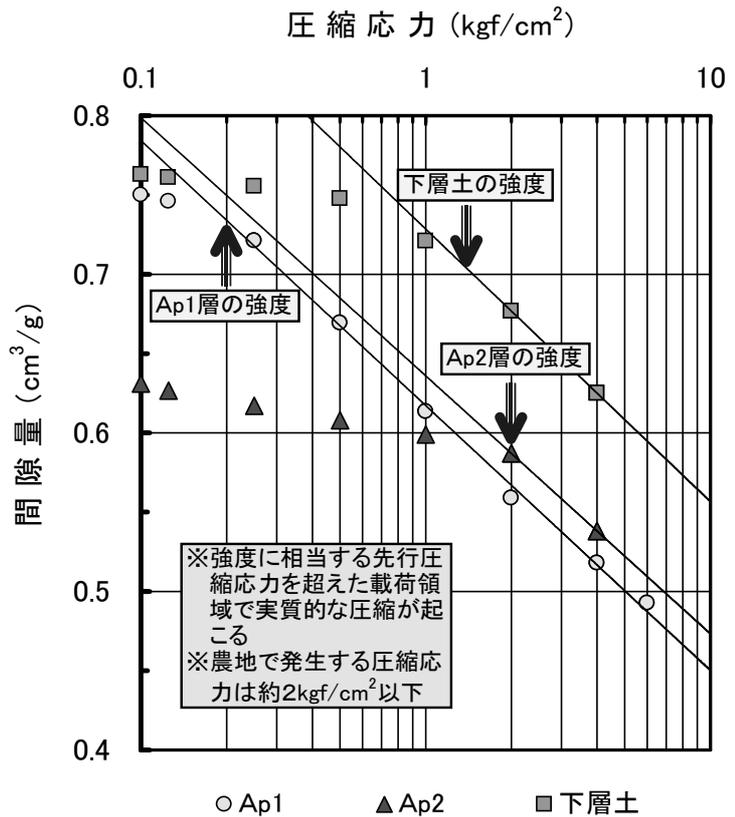
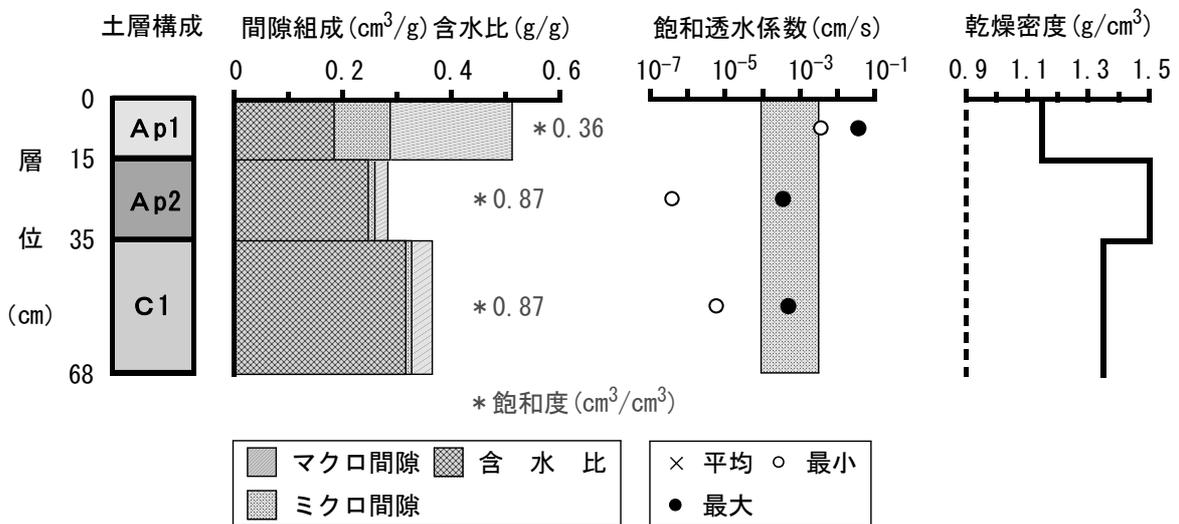


図5 網走地域の黒ボク土畑の圧縮性



タマネギ畑の物理的構造—栗山町三日月 230804

図6 空知地域の灰色低地土畑の物理的構造

kgf/cm^2 以下であると推察される。

黒ボク土に比べて間隙量が少ない灰色低地土の農地でも慣行的な耕耘管理によるAp層の土層分化が起こり、難透水性の耕盤層「Ap2層」が出現している（図6参照）。灰色低地土の場合、Ap2層直下の下層土（C1層）の間隙組成にも問題がみられ、マクロ間隙が黒ボク土に比べて少ないため（ $0.04\text{cm}^3/\text{g}$ ）水はけに難があると言える。図6のタマネギ

畑では深度40～50cm程度の心土破砕が実施されているようであるが、マクロ間隙の再生効果は大きくはない。

2) 物理的機能の適正発現に向けた物理的構造の改善策

北海道の畑作における慣行的な耕耘管理は、Ap層の土層分化を通じてAp層内に常に難透水性の耕盤層「Ap2層」を出現させる農地の物理的構造を作り上げている。Ap2層の存在は、根群域の水はけの低下と連動して作物の根張りを妨げるため生産性に多大の悪影響を与えるが、併せて暗渠排水の機能発現を阻害する原因にもなっている。Ap2層の欠陥の基本は水はけを担うマクロ間隙が極端に少なくなっていることであり、それゆえマクロ間隙の再生による物理的構造の改善策が必要となるが、併せて改善された物理的構造を保全できる耕耘管理の適正化を図らなければならない。

図7は、図2および図6の物理的構造の土壌による違いを間隙量～含水比関係⁵⁾として示したものである。なお図7における十勝（黒ボク土）、空知（灰色低地土）のAp層と下層土は、土性区分としてはそれぞれ同一である。

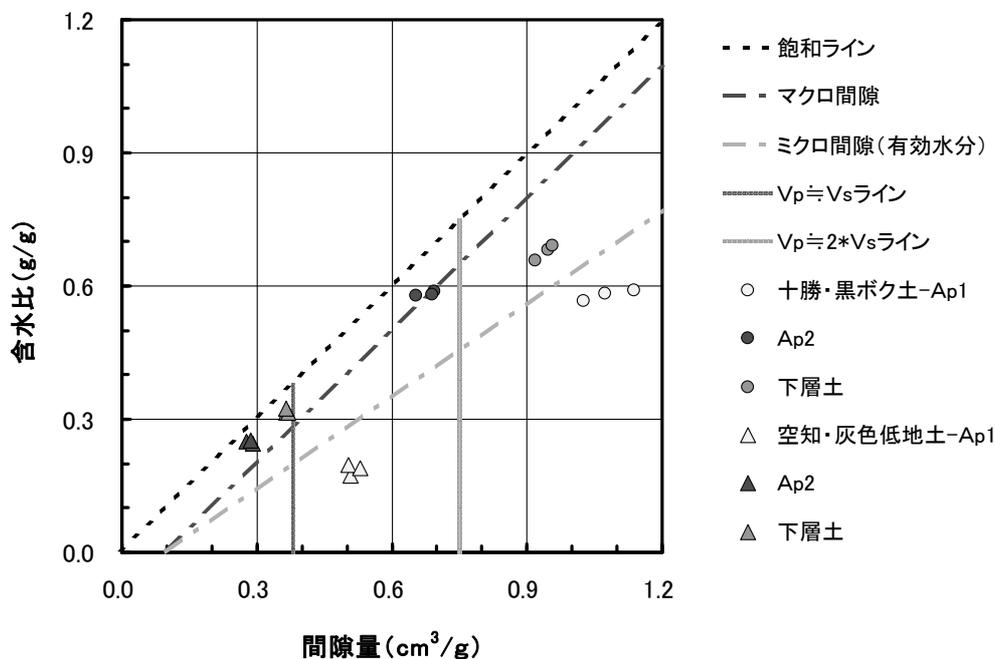


図7 黒ボク土と灰色低地土の間隙量～含水比関係の対比

過度の砕土によりマクロ間隙が極端に増加したAp1層は、攪拌砕土の蒸発促進効果と過大な浸入度による水もちの低下が相まって含水比が著しく低下し、「マイクロ間隙（有効水分）ライン」の下方すなわち作物生育に必要な有効水分が不足する領域にプロットされる。攪拌砕土後のAp1層は播種・定植の場であるが、このような水分状況では発芽・活着が阻害される危険性が極めて大きくなる。一方、土壌圧縮によりマクロ間隙が縮小したAp2層は水はけが制限されるために「マクロ間隙ライン」上にプロットされるが、マクロ間隙の縮小が顕著な場合にはプロットは「飽和ライン」に近づく。物理的機能の発現状況が良好であれば、プロットは「マクロ間隙ライン」と「マイクロ間隙（有効水分）ライン」に囲まれた領域に収まる。図7をみると、十勝の下層土を除いた他は物理的機能の適正発現が困難な状況にあることが伺える。土壌による違いは間隙量に現れ、空知は $V_p \cong V_s$ ライン（間隙量 $0.38 \text{ cm}^3/\text{g}$ ）、十勝は $V_p \cong 2 * V_s$ ライン（間隙量 $0.75 \text{ cm}^3/\text{g}$ ）近傍にプロットされる。

それぞれの下層土に対するAp1層とAp2層のプロットは対称的であり、慣行的な耕耘管理の繰り返しを通じてプロットの位置交換をし、水もちが徐々に低下していく。間隙量の多少に関わらず物理的機能の適正発現を可能にする領域は存在するが、間隙量の減少に伴い領域は狭くなる。従って、十勝に比べて間隙組成の適正範囲が狭い空知では精度の高い土壌管理が要求されることになる。

慣行的な耕耘管理が、Ap層中に難透水性の耕盤層「Ap2層」が常に存在する物理的構造を形成することを述べてきたが、このような物理的構造を改善する土壌管理法が「省耕起」¹⁾である。省耕起とは、①耕耘管理から「プラウ反転耕起」を省き、②低速心破（時速2km程度の心土破碎）により既存の難透水性の耕盤層「Ap2層」中に0.10cm³/g程度のマクロ間隙を再生するとともに、③収穫残渣の表層鋤込みにより表層の物理的構造の安定化を図る管理法である。

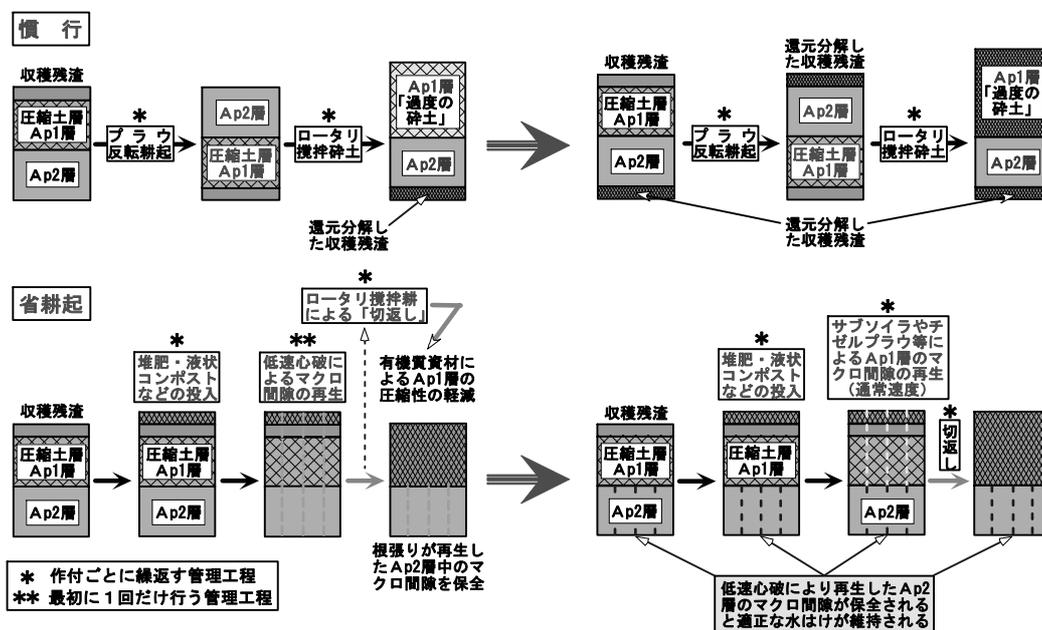


図8 土壌管理法「省耕起」の管理工程

図8⁶⁾は慣行的な耕耘管理と省耕起の管理工程を比較したものであるが、省耕起で作付ごとに繰り返される工程は上述の③の工程である。③の工程において、堆肥やふん尿スラリーなどの微生物資材を併用することにより収穫残渣の有機物分解と、物理的構造の安定化の促進が期待できる。

省耕起による農地の物理的構造の改善事例として、図2に示した圃場の場合を図9に示すが、土壌圧縮によって減少した間隙量の修復は無理としてもマクロ間隙の再生は図られており、水はけの適正発現による根張りの拡大も確認されている。

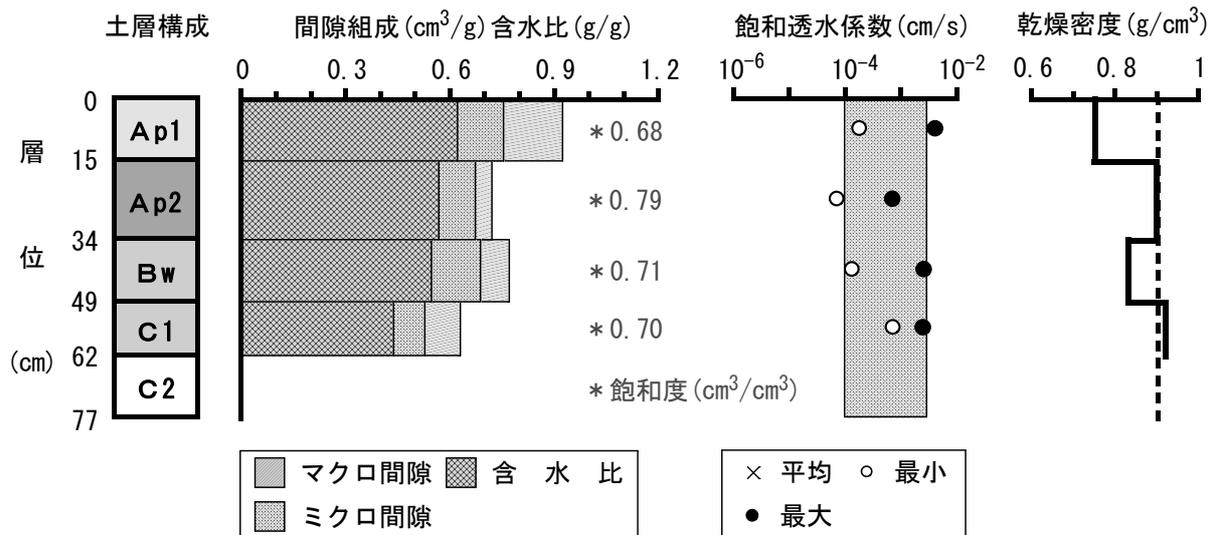


図9 土壤管理法「省耕起」を導入した畑圃場の物理的構造

4. まとめ

食料生産の場として利用している農地における適切な土壤管理は、持続的な農業を組み立てる上で極めて重要であるにも関わらず、「営農の範疇」という枠組みの下で管理目標や管理方法の検討が十分に行われてこなかったように思われる。これまで述べてきたように、北海道の畑作における慣行的な耕耘管理は農地の物理的構造の劣悪化を招く恐れが強く、ひいては暗渠排水や土層改良を含めた農地整備の効果発現をも妨げることに繋がりがかねない。農地の物理的構造の適正化は物理的機能の発現を通じて、根張り根系の代謝活動、肥効、微生物活性にまで影響を及ぼすことから、物理的構造の的確な判定に基づいた管理方法の確立を目指す必要がある。そこには、農地の物理的構造は常に確認して修復・保全を図るべしという視点を「営農の範疇」の中に組み入れることが肝要かと思われる。

ここで取り上げた土壤管理法「省耕起」にしても、営農管理における機械化体系の面では未解決な問題が多く、今後も常に見直しを加えて行かなければならないと肝に銘じている次第である。

参考文献

- 1) 相馬：静かなブーム「省耕起」とは、ニューカントリー（株北海道協同組合通信社），690，15～17（2011）。
- 2) 藤内・相馬：北海道の畑圃場の物理的構造と改善方法，農業農村工学会誌，80，466～467（2012）。
- 3) 相馬・成田・小口・常松：農地土壌の間隙組成と物理的機能の関連性，第62回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，74～77（2013）。
- 4) 相馬・山口：北海道の農地土壌の物理的構造の特徴，第56回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，100～105（2007）。
- 5) 相馬・常松：農地土壌の判別指標，第63回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，96～99（2014）。
- 6) 相馬・常松：北海道の畑圃場の排水不良要因と改善策に関する一考察，北海道土地改良設計技術協会報文集，24，1～7（2012）。