

	プリウオコ ハリ クンチョロ
氏 名	PURWOKO, Hari Kuncoro
本籍（国籍）	インドネシア
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連研第 642号
学位授与年月日	平成27年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当課程博士
研究科及び専攻	連合農学研究科 生物生産科学専攻
学位論文題目	Studies on transport properties of soil gas and water, as well as pore structure indices, as affected by compaction and existence of the applied organic matter(締め固めと施用した有機物の影響を受けた土のガスと水の輸送特性及び間隙構造の指標に関する研究)
学位審査委員	主査 教授 古賀 潔 副査 准教授 金山 素平 副査 教授 安中 武幸 副査 教授 佐々木 長市

論文の内容の要旨

Operation of farm machinery in agricultural fields is the main cause of soil compaction, which may have detrimental effects on soil gas and water transport properties which play a role as one of the important determinants of soil quality for supporting plant growth. On the other hand, application of organic matter (OM) into the agricultural field has been well known to reduce the adverse effects of soil compaction and to improve the transport properties of soil gas and water. To date, however, experimental data on the effect of soil compaction on those soil gas and water transport properties and its relationship to the presence of the applied OM particularly at the early period after application when the decomposition process of OM has not yet taken place remains scarce. In addition, data on the effects of soil compaction and applied OM on soil macropore structure indices, more particularly on pore continuity, have yet rarely been documented.

The effect of soil compaction and the applied OM on relative gas diffusivity $(D_p/D_0)_{100}$ as well as air permeability (k_{a100}) at a soil matric suction of -100 cm H_2O (soil pF 2.0) and saturated hydraulic conductivity (k_s) were investigated using disturbed sample taken from 0 – 15 cm layer of a sandy loam Japanese volcanic ash soil (andisol) mixed with rice husk, rice straw, compost, sawdust, and wood bark at a rate of 20% of the soil volume. This disturbed sample was collected from the site of “Takizawa” experimental field of Iwate University (39°46'59.5" N, 141°07'35.7" E) and it was preliminary lightly sieved (4.76 mm) to maintain its uniformity. The rate of 20% OM was chosen since this rate was considered to be practical and yet distinctive to see the effectiveness of the applied OM in changing soil physical properties.

The measurement of $(D_p/D_0)_{100}$ and k_{a100} was performed using a tool and method from Kuncoro and Koga (2012) whereas the measurement of k_s was performed using the constant head method. In this case,

the measurement of $(D_p/D_0)_{100}$ and k_{a100} was conducted at soil pF 2.0 because soil water matric suction at this level represents condition near to the field capacity for the most common agricultural field at which air content (ε) is minimum after immediate drainage so that the measured variables may represent the least value. Moreover, this pF level has been shown describing well D_p/D_0 for many soils with different texture taken from different soil horizons, and the measured k_a may provide information about changes and differences in soil structure. Besides, higher pF condition may result in a shrinkage of soil which can lead into failures on the measured D_p/D_0 and k_a .

The common compaction caused by farm machinery in agricultural fields was simulated in the laboratory using a static compression load of 150, 225, and 300 kPa at 0.7 g g^{-1} in soil water content referring to the original state of the soil when the sampling was conducted. This static compression was performed upon a targeted 471 cm^3 soil cylinder (10 cm wide and 6 cm long) using a floating-type soil cylinder with a piston those attached to the triaxial cell test machine by which friction between the soil sample and cylinder wall may be suppressed by about a half as the mechanism allowed a concomitant downward and upward compressions. This compression device also allows the production of a rather large diameter of soil specimen which suppresses edge effects between the soil sample and cylinder wall so that possible leakage or bypass along the cylinder perimeter can be minimized. The effect of compaction as well as the applied OM on the corresponding dry bulk density (ρ_d), total porosity (f), air content at soil pF 2.0 (\hat{a}_{100}), and pore size distributions was also further examined.

Volume of macropores ($\phi \geq 30 \mu\text{m}$) and micropores ($\phi < 30 \mu\text{m}$) were expressed as volume of air and water at $-100 \text{ cm H}_2\text{O}$ soil matric suction, respectively.. The volume of air and water should be expressed in air volume ratio and water volume ratio, respectively, relative to the volume of soil solid in order to address the matter of fact that the volume of soil has actually changed. This change in soil volume is more pronounced as a reduction in the volume of macropores, whereas the volume of soil solid remains constant or do not undergo an appreciable change after the compaction process took place. For determination of the other pore structure indices, specific gas diffusivity (S_{D100}) and specific air permeability (S_{ka100}) were calculated as $(D_p/D_0)_{100}/\varepsilon_{100}$ and $k_{a100}/\varepsilon_{100}$, respectively, as previously defined by other researchers in the literatures. By referring to knowledge that soil macropore is the almost exclusive determinant of water transport when the soil is saturated and by taking an analogy to the concept of S_{D100} and S_{ka100} , specific hydraulic conductivity (S_{ks}) was proposed as another index of the soil pore structure indices and defined as k_s/ε_{100} in this study. In addition, a generalized Kozeny-Carman equation as found in the literature has been employed to analyze the sensitivity of $(D_p/D_0)_{100}$, k_{a100} , and k_s to the change in the volume of macropore (ε_{100}) by using the slope of linear regression line of the log-log graph of these targeted variables and ε_{100} , respectively.

The results showed that compaction significantly increased ρ_d , which was followed by a reduction in f , and the mixed OM resulted in a significantly lower ρ_d and higher f than the control. The compaction also reduced \hat{a}_{100} , $(D_p/D_0)_{100}$, k_{a100} , and k_s , with the more pronounced significant difference between 150 and 300 kPa compactions. The decrease in $(D_p/D_0)_{100}$ was likely attributable to a reduced air content, and the decrease in k_{a100} and k_s was likely attributable to a reduced volume of macropores, as indicated by the reduced \hat{a}_{100} values.

Compared with the control, addition of sawdust and wood bark seemed to have the most positive effect on $(D_p/D_0)_{100}$, k_{a100} , and k_s in term of resistance to compaction, while rice straw had the opposite

effect. The presence of OM was likely to block the soil pores and increase capillary water in the bottle-neck, leading to lower values of $(D_p/D_0)_{100}$ and k_{a100} for a given value of a_{100} (“blockage effect”). These pores blocked by OM, however, seemed to allow the water to flow through the soil matrix (“ceramic filter effect”).

The volume of macropores was reduced by compaction whereas the volume of micropores remained unaffected. In this case, the mixed OM tended to result in a higher volume of macropores than the control. Compaction resulted in more tortuous macropores for gas diffusion (lower S_{D100}) and less continuous macropores for gas convection (lower S_{ka100}) for which a significant difference was more pronounced between the 300 and 150 kPa compactions. Compaction also resulted in fewer continuous macropores for water movement as indicated by lower S_{k_s} .

The mixed OM was likely to result in a lower S_{D100} . On the other hand, it tended to result in a higher S_{ka100} except for rice straw. In addition, the mixed OM also seemed to result in a higher S_{k_s} than the control. Of the OM-mixed soils, the decrease in $(D_p/D_0)_{100}$ and k_{a100} was more sensitive to compaction (i.e., decrease in ε_{100}) than that of the control whereas the decrease in k_s acted conversely. Further studies on the prolonged application of OM at field scale, taking into account the decomposition process, should be conducted.

日本語要約

農地における圃場機械の運行は土壌の締固めの主な原因である。締固めは作物の生育を支えるための土壌の質の重要な決定要因の一つである土壌ガスと水の輸送に対して悪い影響となる場合がある。他方、有機物 (OM) を農地に施用することは土壌の締固めの悪い効果を減じ、また土壌ガスと水の輸送特性を改善することがよく知られている。しかしながら現在までのところ、土壌ガスと水の輸送特性に対する締固めの効果と、特に OM の分解がまだおきていない施用初期の期間での施用された OM と締固めの効果の関係についての実験的データは少ない。加えて、土壌の締固めと施用された有機物の土壌の粗間隙構造指標への影響、特に間隙の連続性についてのデータはあまり情報が提供されていない。

-100cmH₂O (土壌 pF2.0) の土壌のマトリクスサクションにおける相対ガス拡散係数 $(D_p/D_0)_{100}$ と通気係数 (k_{a100}) 及び飽和透水係数 (k_s) を、0-15cm から採取した日本の火山灰土 (andisol) の攪乱試料にモミガラ、イナワラ、堆肥、オガクズ、バークを土壌体積の 20% の割合で混ぜたものを用いて調べた。この攪乱試料は岩手大学滝沢農場 39°46'59.5" N, 141°07'35.7" E から採取し、均一にするため 4.76mm で予め軽く篩った。20% という割合は、実際的にかつ施用された OM が土壌の物理性を変化させる明確な効果を見る事ができると考えられたので選んだ。

$(D_p/D_0)_{100}$ と k_{a100} の測定は Kuncoro and Koga (2012) の器具と方法により実施し、一方 k_s の測定は定水頭法によった。この場合、 $(D_p/D_0)_{100}$ と k_{a100} の測定は pF2.0 で行った。なぜなら、この水準の土壌水分張力はほとんどの農地の圃場容水量を表しているからである。圃場容水量においては空気含量 (\square) が排水直後の最小値であり、測定される値は最小値を示す。加えて、この pF レベルの等価間隙径は様々な土壌断面から採取された様々な土性の多くの土壌について D_p/D_0 をよく表すことが示されており、測定された k_a は土壌構造の変化や相違についての情報を与えてくれる。さらに、より高い pF 条件では土壌の収縮がおきる可能性があり、 D_p/D_0 と k_a の測定の失敗につながる可能性がある。

農地での圃場機械による通常の締固めを、実験室では採取した時の元の状態の土壌水分

0.7gg⁻¹で、150, 225, 300kPaの静的圧縮荷重で模した。この静的荷重はフローティングタイプの土壌円筒を用いて471 cm³の土壌円筒(幅10 cm, 長さ6 cm)に対してピストンにより加えられた。このピストンは三軸圧縮試験機に取り付け、上下から圧縮させる機構により土壌と円筒の間の摩擦を約半分に減ずることができる。この圧縮装置はまた土壌試料の直径をかなり大きくすることができる。このことは土壌試料と円筒壁面の間の壁面効果を減じ、その結果円筒内壁に沿う漏れを最低限にできる。さらに、締固めと施用したOMの乾燥密度(ρ_d)、全間隙率(f)、pF 2.0における空気含量(\hat{a}_{100})、間隙径分布への影響も検討した。

粗間隙($\phi \geq 30 \mu\text{m}$)と微細間隙($\phi < 30 \mu\text{m}$)の体積は-100 cm H₂Oの土壌吸引圧における空気と水分の体積でそれぞれ表される。土壌の体積が実際に変化したことを表すためには、空気と水の体積は土壌の固相体積に対する空气体積比と水体積比で表されるべきである。この土壌体積の変化は粗間隙の体積の減少である一方、土壌の固相の体積は締固め過程がおきた後でも一定であるか、感知し得るほどの変化は起きない。この他の土壌構造の指標を決定するために、比ガス拡散係数(S_{D100})と比通気係数 S_{ka100} を、文献における過去の他の研究者による定義にならって、それぞれ(D_p/D_0)₁₀₀/ ϵ_{100} と k_{a100}/ϵ_{100} で計算した。土壌が飽和している時、土壌の粗間隙は水移動のほとんど唯一の決定要因であるとの知見を参考にして、本研究では S_{D100} と S_{ka100} の概念に似せて、比透水係数(S_{ks})をもう一つの土壌間隙構造の指標として提案し、 k_s/ϵ_{100} で定義した。加えて、文献に見られるように一般化された Kozeny-Carman 式が粗間隙の体積(ϵ_{100})の変化に対する(D_p/D_0)₁₀₀、 k_{a100} 、と k_s の感受性を分析するために、これらの変数と ϵ_{100} の log-log グラフの回帰直線の勾配により用いられてきた。

結果は締固めは明確に ρ_d の増加とこれに伴う f の減少を示した。また、混入されたOMは対照区と比べて有意に低い ρ_d と高い f をもたらした。 $(D_p/D_0)_{100}$ の減少は空気含量の減少に、 k_{a100} と k_s の減少は粗間隙の体積の減少に起因すると考えられた。

対照区と比較して、オガクズとバークの添加は(D_p/D_0)₁₀₀、 k_{a100} 、と k_s に対して締固めへの抵抗に関して最も正の効果が高く、イナワラは逆であった。OMの存在は土壌間隙を閉塞しポトルネックにおける毛管水の増加をもたらし、与えられた \hat{a}_{100} に対しより低い(D_p/D_0)₁₀₀と k_{a100} をもたらすと考えられた(閉塞効果)。しかしながら、OMによって閉塞された間隙は土壌を通しての水の流れは許すと考えられた(セラミックフィルター効果)。

締固めによって粗間隙の体積が減少する一方、微細間隙の体積は影響を受けなかった、この場合、OMの混合は対照区と比べて粗間隙の体積を増加させた。締固めはガス拡散のためのより屈曲した粗間隙をもたらす(低い S_{ka100})。これについては、300kPaと150kPaの間の相違がより明瞭であった。また、締固めにより、より低い S_{ks} で示されるように水移動のための連続間隙がより少なくなった。

OMの混合はより低い S_{D100} をもたらした。一方、OMの混合はイナワラを除くとより高い S_{ka100} となる傾向があった。加えて、OMの混合は対照区より高い S_{ks} をもたらす傾向があった。OM混合土については、対照区と比べて締固め(すなわち、 ϵ_{100} の減少)に対して(D_p/D_0)₁₀₀と k_{a100} の減少はより敏感であった、これに対し k_s の減少は明瞭とはいえなかった。分解過程を考慮した圃場スケールでの長期にわたるOMの施用についての研究が今後必要である。

論文審査の結果の要旨

農地における圃場機械の運行は土壌の締め固めをもたらす、土壌ガスと水の輸送に対して悪い影響を与える場合がある。他方、有機物（OM）を農地土壌に混入することは締め固めの負の効果を減じ、土壌ガスと水の輸送特性を改善することが知られているが、土壌ガスと水の輸送特性に対する締め固めの効果と、特に OM の分解がまだおきていない施用初期の期間の効果についての実験的データは少ない。加えて、土壌の締め固めと施用された有機物が土壌の粗間隙構造指標へ与える影響、特に間隙の連続性・屈曲性などについてのデータは少ない。申請者はこれらの点を明らかにすることを目的として研究に取り組んでいる。

岩手大学滝沢農場 0-15 cm から採取したクロボク土に、モミガラ、イナワラ、堆肥、オガクズ、バークを 20%の体積割合で混ぜ、フローティングタイプの圧縮装置により 150, 225, 300 kPa の荷重で静的に締め固めて供試体を作製した。飽和透水係数 k_s を測定した後 -100 cm H₂O (pF 2.0) の土壌のマトリックポテンシャルに調整して、申請者らが製作した測定装置により相対ガス拡散係数 $(D_p/D_0)_{100}$ と通気係数(k_{a100})を測定した。また、間隙径分布を検討するために pF 試験も併せて実施した。

締め固めの結果、乾燥密度 ρ_d の増加と間隙率 f の減少が有意に認められ、OM の混入土では対照区と比べて有意に低い ρ_d と高い f となり、OM の効果が認められた。締め固めによる $(D_p/D_0)_{100}$ の減少は空気含量の減少に、 k_{a100} と k_s の減少は粗間隙の体積の減少に起因すると考えられた。この間隙体積の減少を評価するには、間隙率 f や空気間隙率 ε ではなく、土壌の固相体積に対する空气体積比や水体积比を用いるべきであるとの考察を行い、締め固めによる粗間隙($\phi \geq 30 \mu\text{m}$)と微細間隙($\phi < 30 \mu\text{m}$)の体積比の変化を検討した結果、締め固めによって粗間隙の体積が減少する一方、微細間隙の体積は影響を受けなかったことが明確に示された。

OM の種類による相違としては、オガクズとバークの添加は $(D_p/D_0)_{100}$, k_{a100} と k_s に対して締め固めへの抵抗に関して最も正の効果が高く、イナワラは逆であった。OM の存在は土壌間隙を閉塞しボトルネックにおける毛管水の増加をもたらすため、同一の ε_{100} に対しより低い $(D_p/D_0)_{100}$ と k_{a100} をもたらしたものと考えられた（閉塞効果）。しかし、OM によって閉塞された間隙は飽和状態では水の流れは許すと考えられた（セラミックフィルター効果）。

また、土壌間隙構造の指標として従来からの比ガス拡散係数(S_{D100})と比通気係数 (S_{ka100})に加えて比透水係数(S_{ks})を導入し、実験結果を考察している。

以上の様に本論文は、有機物を混入した締め固め土の土壌ガスと水の輸送特性に関して正確な分析を行うとともに、新たな知見を得ており、岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準に定める 1～6 の評価項目すべてを満たしているので、審査委員会は本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

学位論文の基礎となる学術論文

1 . Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., Muto, Y. (2014)

A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water

I: Gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity.

Journal of Soil and Tillage Research 143:172-179.

2 . Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., Muto, Y. (2014)

A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water
II: Soil pore structure indices.

Journal of Soil and Tillage Research 143: 180-187.

参考論文

1 . Kuncoro, P.H., Koga, K. (2012)

A simple and low cost method for measuring gas diffusivity and air permeability over a single soil
cylinder.

Journal of The Japanese Society of Soil Physics 120: 55-60.