J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 149, p.23～35 (2021)

論　文
Original Paper

機種や作業者の相違を考慮した貫入式土壌硬度計の定量的な使用に向けた評価

江波戸宗大 [1]

Evaluation of the quantitative use of a cone penetrometer considering differences between models and between operators

Munehiro EBATO[1]

Abstract: To promote the quantitative use of cone penetrometers, we analyzed patterns in the variation and distribution of penetration resistance data that were caused by differences in models and operators. Because of differences in the mechanism of pressure detection between models, the values of penetration resistance tend to be model-dependent around the boundary area above and below the plow pan. This prompted us to carry out data comparison between models.

Nine operators surveyed 60 points each over the entire area of an 0.31-hectare field. The operators were two men and two women in their 40s, a man and two women in their 50s, and two women in their 60s. When weak women or elderly persons penetrated from the plow layer to the plow pan with the cone tip of the cone penetrometer more slowly than strong men, it appeared that the penetration resistance data around the boundary area above the plow pan could be collected more accurately. We conclude that the data necessary for creating three-dimensional distribution maps of soil hardness can be collected if the range of up to 3000 kPa of penetration resistance and 45 cm depth can be measured using a cone penetrometer, making it suitable as a machine setting.

Key Words: cone penetrometer, penetration resistance, arrival depth, operator, paddy

1. はじめに

日本の農業現場では，基幹的農業従事者が平成 27 年から令和 2 年までの 5 年間で 175.7 万人から 136.3 万人（−22.4 %）と急速に減少し，令和 2 年では 65 歳以上が全体の 69.6 % と高齢化が進行している（農林水産省, 2021a）．一方，経営耕地面積規模別に農業経営体数の増減率は，平成 27 年から令和 2 年までの 5 年間で，北海道では 100 ha 以上層で 17.5 %，都府県では 30 ha 以上層で 32 % も増加している（農林水産省, 2021b）．農業機械の大型化や圃場の大区画化によって農作業の効率を向上させる努力が行われているが（今園, 1991; 内田, 2008; 農林水産省農村振興局, 2021），弊害として，大型農業機械の踏圧による作土の浅層化（長野間, 1995）等の土壌物理性に関係する問題も見られるようになった．また，近年の地球温暖化で，巨大台風，ゲリラ豪雨，線状降水帯による洪水，湿害などが頻発し（気象庁, 2018），圃場の排水性を評価する土壌物理性について重要度が増してきた．中野ら（1998）は，土壌硬度分布，飽和透水係数のばらつき，団粒の安定性が排水性の有効な指標であることを明らかにした．北川（2005）は，北海道において，積雪寒冷地での暗渠排水による農地の排水改良を行い，冷湿害時の農業生産性の安定化に及ぼす影響を明らかにした．今まで以上に土壌物理性の良否が作物生産に大きく影響するため，土壌物理性の評価を簡便にしかも迅速に行うことが求められている（安西, 2016）．

従来，土壌物理性を評価するために，土壌断面を作成した後に，層位ごとにコアサンプル数連を採取し，三相分布，含水率，透水性等の測定や pF 水分曲線を作成していた（土壌環境分析法編集委員会, 1997）．しかし，コアサンプルを採取して各種分析を行うにはかなりの手間と時間を必要とする．現場で透水性を評価する手法として，シリンダーインテークレート（土壌物理性測定法委員会編, 1972）や負圧浸入計（Dixon, 1975）等の技術も開発されたが，短時間で次々と測定できる仕様ではない（福本, 2013; 酒寄ら, 1998）．

貫入式土壌硬度計は短時間で貫入抵抗を調査できるが，耕盤層の位置を特定する等，定性的に使われることが多かった（松井ら, 1987; 中津ら, 2004）．古いタイプの貫入式土壌硬度計は，記録紙をセットして貫入抵抗の波形をアナログで記録していた（梅村, 1984; 土壌環境分析法編集委員会, 1997）．海外でも様々なメーカーが貫入

[1]Central Region Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 2-1-18 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8666, Japan. [2]Present address: Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization (NARO), 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan. Corresponding Author:江波戸宗大, 農研機構 農業環境研究部門.
2021 年 6 月 30 日受稿　2021 年 10 月 18 日受理

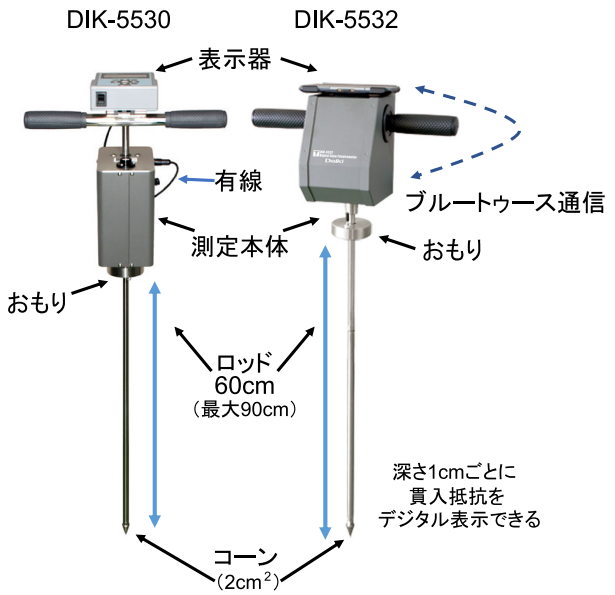


Fig. 1 大起理化工業のデジタル貫入式土壌硬度計.
Overview of digital cone penetrometer made by Daiki Rika Kogyo Co., Ltd. (DIK-5530 and DIK-5532).

式土壌硬度計を販売している（Eijkelkamp Soil & Water, 2014; Humboldt Mfg. Co., 2015）．日本では，大起理化工業株式会社の貫入式土壌硬度計が一般的で，最近の機種として，デジタル土壌硬度計 DIK-5530 や DIK-5532 は，深さ 90 cm までの貫入抵抗を 1 cm 刻みで測定できる （Fig. 1; 大起理化工業株式会社, 2018）．これらを用いて深さ 1 cm ごとに土壌物理性に関する定量的な利用ができれば，土壌物理性診断を行うのに強力なツールとなる．

しかし，貫入式土壌硬度計が定量的に利用されなかったのには理由がある．土壌は含水量の増加と共に状態の変化や変形に対する抵抗の低下が発生する．この現象をコンシステンシーという（地盤工学会, 2010）．コンシステンシーは軟らかい物体が外力を受けた時の変形または流動に対して抵抗する性質なので，物質の種類や目的によって力学的内容（弾性，粘性，塑性等）の測定方法が考案されているが，力学的内容の組み合わせが様々で曖昧なので科学的な解釈が難しい（東山, 1974）．例えば，土壌水分含量が高くなると土壌硬度（貫入抵抗）値は低くなる （前田 · 相馬, 1974）．土壌中の水分含量は位置や深さ，時期，降水の有無によって異なることから，貫入式土壌硬度計で取得された貫入抵抗値は見かけの土壌硬度である（Ebato, 2020）．このため，季節や場所が異なると，貫入式土壌硬度計で取得したデータ間の定量的な比較が難しかった．望月ら（2016）は，岡山県南部地域の乾田直播において貫入式土壌硬度計による苗立ちを予測する試みを行った．これによって苗立ちを階級に分けて，貫入抵抗分布から予測可能となったが，貫入抵抗値ではなく貫入抵抗分布の利用であり，適用範囲は岡山県南部の乾田直播少量播種圃場に限定されるとしている．そこで筆者は時期や土壌水分含量の違いによる貫入抵抗値の変化を予め見込んで，貫入式土壌硬度計を用いて同一圃場内の多地点で調査を行い，圃場内の土壌硬度に関して三次元的な不均一性評価を半定量的に行う技術を開発した（Ebato, 2020）．相対的に貫入抵抗値の低い地点は土壌水分含量が高いと推定されることから，本技術は圃場内の三次元的な土壌水分分布の推定や圃場の排水性向上のための圃場管理指標としての利用を念頭に普及活動が行われている（江波戸, 2020; 高橋ら 2021）．この技術開発の結果，多くの作業者が様々な貫入式土壌硬度計を用いて全国の農業現場で多量のデータを取得するようになれば，土地情報データベースとして集約することで新たな価値が生じる．

DIK-5530 は製造中止のため新規で入手困難であるが，所有している研究機関は多く，現在でも使用されている．取得される貫入抵抗データの傾向や現行の DIK-5532 との相違を明らかにすることで，今まで蓄積された調査結果を活用しながら，貫入式土壌硬度計の定量的な利用を促すことができる．したがって，本研究は，DIK-5530 と DIK-5532 による水田圃場全面における貫入抵抗分布を比較し，測定機器の癖や測定値の傾向を明らかにすることを目的とした．また，貫入式土壌硬度計はロッドを人力で土壌中に押し下げるため，測定値は作業者の身体能力やスキルに依存する可能性がある．このことから，DIK-5532 について作業者による貫入抵抗分布パターンの傾向についても検討を行った．

2. 方法

2.1 調査圃場と調査時期

農研機構 谷和原水田圃場（茨城県つくばみらい市）の水田 3 筆（灰色低地土，圃場 A 10 a，圃場 B 33 a，圃場 C 31 a，Fig. 2）について水稲収穫後に切り株の掃除刈りやレーザーレベラーを用いた均平作業などを行い，次年

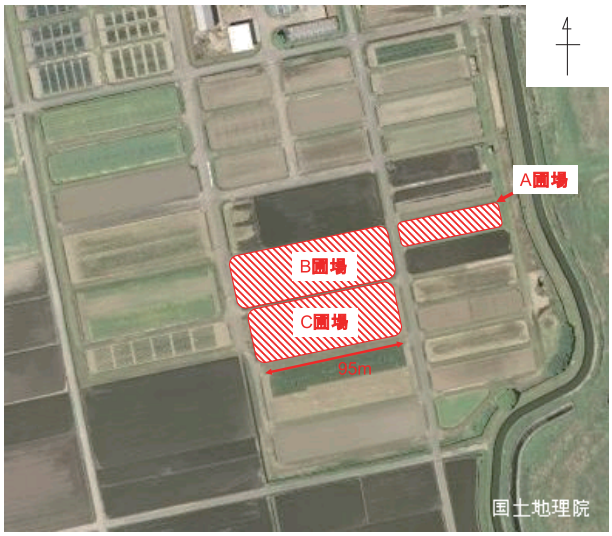


Fig. 2 農研機構 谷和原水田圃場における調査圃場配置図.
Layout of survey fields in the Yawara Paddy Research domain.

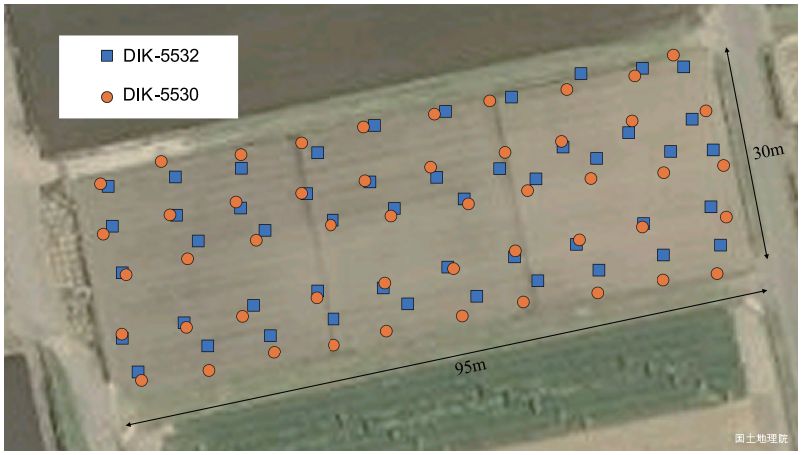


Fig. 3 圃場 C における貫入式土壌硬度計 DIK5530 と DIK5532 の調査地点.
Survey points for the cone penetrometers (DIK-5530 and DIK-5532) in Field C.

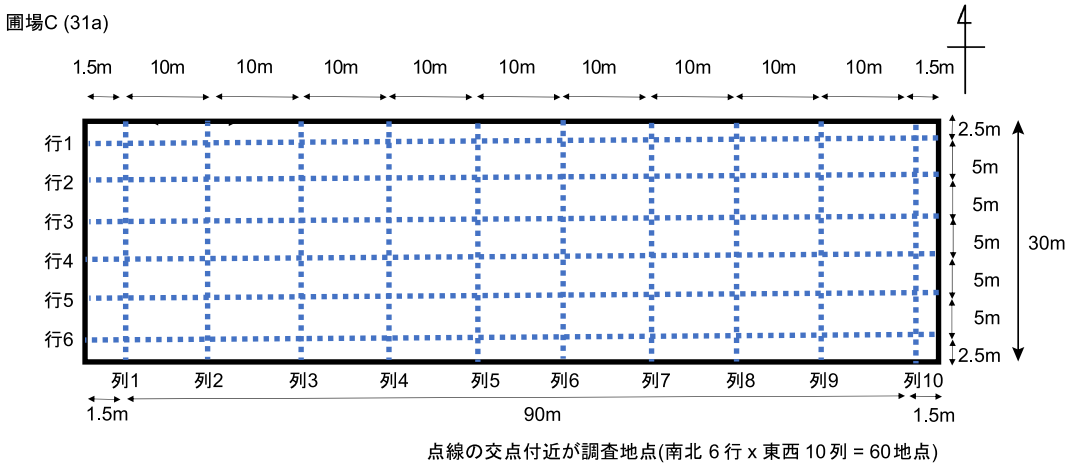


Fig. 4 DIK-5532 による貫入抵抗測定に関して作業者間の比較のための圃場 C の調査地点概要.
Layout of Field C for examining differences between the operators with respect to penetration resistance measurements using the DIK-5532 cone penetrometer.

度に向けて圃場管理作業が終わった状態で 2017 年 2 月に調査を行った．機種別の貫入抵抗分布を測定した後，整地のためにロータリーをかけてから，作業者別の貫入抵抗分布の測定を行った．

2.2 DIK-5530 と DIK-5532 における機種別の貫入抵抗分布パターンの比較

水田 3 筆において DIK-5530 と DIK-5532 による調査地点を同じ位置にするため，GPS や GLONASS などの全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System，以下 GNSS）を活用し，GNSS ロガーを参照しながら圃場全面で貫入抵抗を同日中に調査した（圃場 A $n = 30$，圃場 B $n = 60$，圃場 C $n = 50$）．一例として圃場 C の調査地点を Fig. 3 に示す．機種別に深さ 1 cm ごとの貫入抵抗について平均を算出し，深さ方向に並べて貫入抵抗の垂直分布を比較した．

調査地点ごとに採取したデータにタイムスタンプがつくので，貫入抵抗 1 回を測定するのに必要な時間の平均値を計算した．

測定時間（分 / 地点）＝（（最後の調査地点タイムスタンプ＋最後の調査地点の測定時間）− 最初の調査地点タイムスタンプ）/（調査地点数）

2.3 DIK-5532 における作業者別の貫入抵抗分布の比較

水田 1 筆（圃場 C 31 a）を長辺方向 10 m メッシュ，短辺方向 5 m メッシュで区切り，縦横が交わる地点（$n = 60$）をマーキングした（Fig. 4）．年齢および性別の異なる 9 名により DIK-5532 を用いてマーキング地点付近の貫入抵抗を調査した．貫入式土壌硬度計によって圃場全体の土壌硬度三次元分布を調査する手法では，複数の衛星測位システムを補足できる GNSS ロガーで位置情報を記録しながら，貫入式土壌硬度計で貫入抵抗を測定しているが（Ebato, 2020），扱う電子機器が増えると操作ミスが多発する恐れがあったため，作業者が調査地点を直ちに特定できる方法を選択した．貫入式土壌硬度計と GNSS

ロガーを用いた調査と作業状況を似せる目的で，貫入式土壌硬度計の操作だけに集中させないように，GNSS ロガーを操作する代わりに，調査地点間の歩数を数えて記録用紙に記載するダミー操作を作業に含めた．作業者 9 名についても機種別の調査と同様に貫入抵抗 1 回を測定するのに必要な時間の平均値を計算した．

作業者 9 名の内訳は，谷和原水田圃場の業務科職員 3 名（男性），および契約職員 6 名（女性）で，年齢構成は，40 代 男性 2 名 · 女性 2 名，50 代男性 1 名 · 女性 2 名，60 代 女性 2 名である．使用できる貫入式土壌硬度計の数や作業性を考慮して，業務科職員 1 名を班長として契約職員 2 名のサポートを行う体制を構築した．作業者グループ α，β，γ の 3 班に分け，各班の作業者を区別するため，（α1, α2, α3），（β1, β2, β3），（γ1, γ2, γ3）と番号をつけた．

貫入式土壌硬度計を使った経験のある作業者は 2 名だけで，その 2 名も今回のように多地点での測定を行ったことはなかった．作業者の大多数が貫入式土壌硬度計の操作を初めて行うので，実際の作業前に操作手順を教え，調査には使用しない圃場で 1 時間程度の練習を行った．作業者について素人に近い人選をしたのには理由がある．貫入式土壌硬度計の操作は他の土壌物理性調査方法と比較して簡便であり，将来的に貫入式土壌硬度計による調査を研究とは縁のない一般人にアルバイトなどの一時雇用の形で発注することを考えたからである．データ収集に関して労働力の確保および人件費などのコスト削減を念頭に置いた判断である．農業従事者数は今後減少し，今まで以上に 1 人あたりの栽培面積が拡大する（内田, 2008; 農林水産省, 2020）．この状況を打開するため，農業従事者には農作業に専念してもらい，他からの労働力供給源として，高齢者や女性，障害者等を想定した．本調査では，40 代以上の女性を対象とした．

作業者による相違を明確化するため，作業者別に測定時間や欠損値および操作ミスの情報を収集した．操作ミスとは，具体的には，機器操作手順の誤り（おもりを下端まで引き下げずに測定など），表示器として使われるスマートフォンのボタンの押し違えやデータ保存ミス等を想定した．次に，作業者別および調査地点別に貫入式土壌硬度計のコーン到達深度分布図を作成し，箱ひげ図を用いて，作業者ごとのコーン到達深度の傾向を解析した．

さらに，圃場 C における土壌硬度調査地点において，土壌硬度の水平方向の面的な分布を 1 cm ごとに深さ方向でクラスター分析を行い，作業者による作土層，耕盤層，下層の位置の相違を検討した．クラスター分析は統計ソフト R（Ver.3.6.3）でユークリッド距離，ウォード法を用いた（R Core Team, 2020）．

3. 結果と考察

3.1 調査時における農研機構 谷和原水田圃場付近の気象と土壌水分の状況

農研機構 谷和原水田圃場における調査半年前からの降水量と蒸発量の推移について，2016 年 12 月後半から降水量および降水イベントは減少傾向であったが，蒸発量および蒸発イベントは増加傾向であった（Fig. 5-1）．谷和原水田圃場の気象観測システムには土壌水分センサが設置されていない．土壌水分の状況を推測するため，便宜的に日ごとの降水量と蒸発量の差を積算して冬季における土壌水分のフローを評価すると，調査を行った 2017 年 2 月中旬から下旬にかけて積算値が一番大きかった（Fig. 5-2）．このことから，調査を行った時期に土壌が一番乾燥していると考えられた．

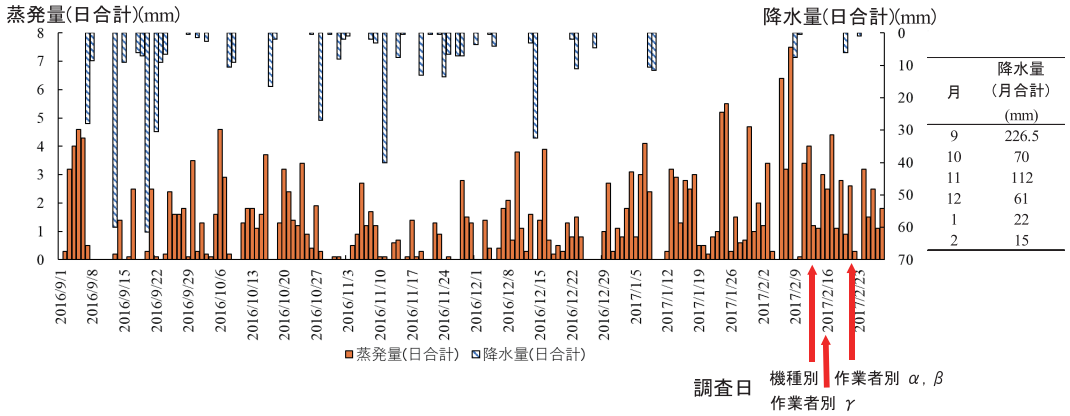
調査を行った地域の土壌水分の状況をさらに検討するため，谷和原水田圃場から東に 7.45 km 離れたところに設置されている農研機構農村工学研究部門の気象観測データ（吉田ら, 2012）を確認した（Fig. 6）．2016 年 9 月から 2017 年 8 月までの 1 年間の日積算雨量と深さ 5，10， 30， 50 cm の日平均土壌水分の推移を確認すると，2017 年 1 月から 3 月にかけて降雨も少なく，日平均土壌水分が安定して低い傾向であった．土壌水分含量が低いと土壌硬度（貫入抵抗）が高くなるのは前述の通りである．以上のことより，今回の調査を行った時期が一年のうちで安定して土壌水分が低く，土壌硬度や貫入抵抗が相対的に高く検出されるので，機種や作業者の相違，また，貫入式土壌硬度計で取得できるデータの傾向を把握するには最適と判断された．

3.2 機種別の貫入抵抗分布パターンの比較

圃場ごとに機種による貫入抵抗分布パターンの相違について Fig. 7 に示した．圃場 A，B は耕盤層から下層にかけて硬く，コーン先端が深さ 60 cm まで到達しない地点が数多く生じたため，調査地点すべてでデータを収集できた深さ 30 cm までを貫入抵抗値として解析した．耕盤層について貫入抵抗値から判断して，圃場 A および圃場 B は深さ 15 cm 以上，圃場 C は深さ 19 cm から 35 cm の範囲と考えられた．

貫入抵抗値はどの圃場でも表層のうちは DIK-5530 の方が高い傾向だったが，DIK-5532 の方が耕盤層にかけて貫入抵抗値の立ち上がりが俊敏で一時的に DIK-5530 の値を上回ることもあった．DIK-5530 と DIK-5532 の差分を取ると，1 から 10 cm はプラス値で，耕盤層にさしかかってくると反転してマイナス値になる傾向であった．また，圃場 C については，深さ 40 cm 以下になると DIK-5530 の方がゆっくりと貫入抵抗値が低くなる傾向にあった．これは，圧力測定に関して DIK-5530 はスプリング（機械式）であるのに対し，DIK-5532 はロードセルによって検出しているため，DIK-5532 の方が貫入抵抗の変化を素早く捉えられていると考えられた．この現象により，圃場 A および圃場 C ではコーン先端が耕盤層を通過後に DIK-5532 の貫入抵抗値が軟らかめに計測される傾向にあったと考えられた．

DIK-5530 による貫入抵抗測定の実測値例を Table 1 に示す．調査地点 No. ごとに 1 cm 刻みで深さ 20 cm ま



月	降水量（月合計）(mm)
9	226.5
10	70
11	112
12	61
1	22
2	15

Fig. 5-1　農研機構 谷和原水田圃場における調査半年前からの降水量（日合計，月合計）と蒸発量（日合計）の推移.
Changes in daily and monthly precipitation and daily evaporation from six months before the survey in the Yawara Paddy Research domain.

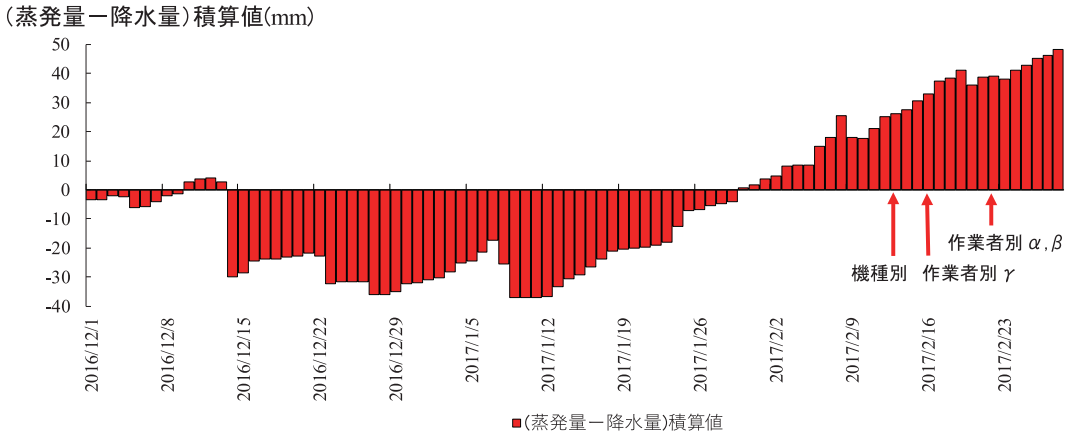


Fig. 5-2　農研機構 谷和原水田圃場における冬季（2016/12/1 – 2017/2/28）の蒸散量（日合計）と降水量（日合計）の差に関する積算値の推移.
Changes in accumulation of difference between daily evaporation and daily precipitation during winter season (2016/12/1–2017/2/28) in the Yawara Paddy Research domain.

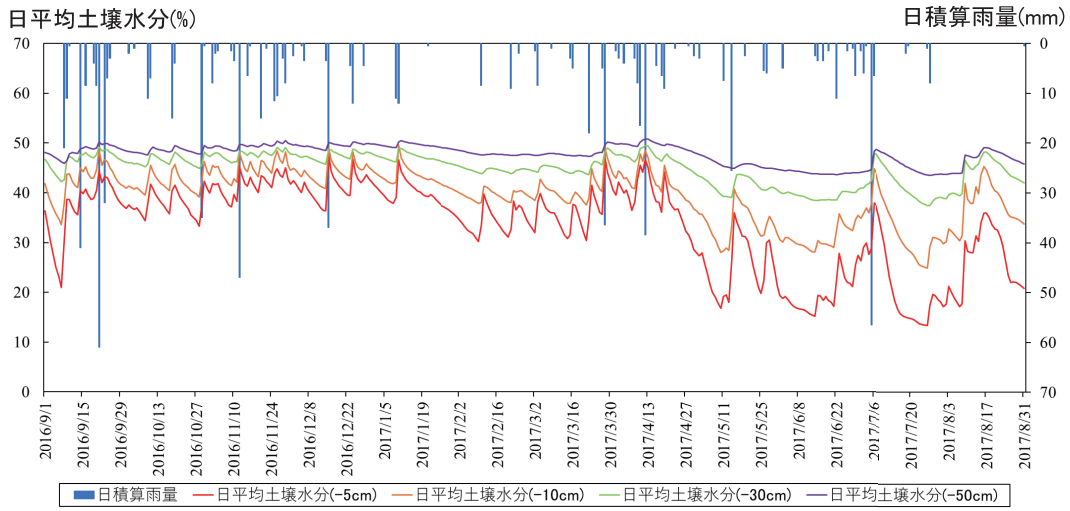


Fig. 6　農研機構 農村工学研究部門の気象観測システム（つくば市観音台, 農研機構 谷和原水田圃場より東に 7.45 km）による，日積算雨量と深さ 5，10，30，50 cm における日平均土壌水分の推移 （2016/9/1 – 2017/8/31）.
Changes in daily cumulative rainfall and daily average soil moisture at 5, 10, 30 and 50 cm depth from 2016/9/1 to 2017/8/31 by the Weather System of Institute for Rural Engineering, NARO (Kannondai, Tsukuba City), where is 7.45 km east from the Yawara Paddy Research domain.

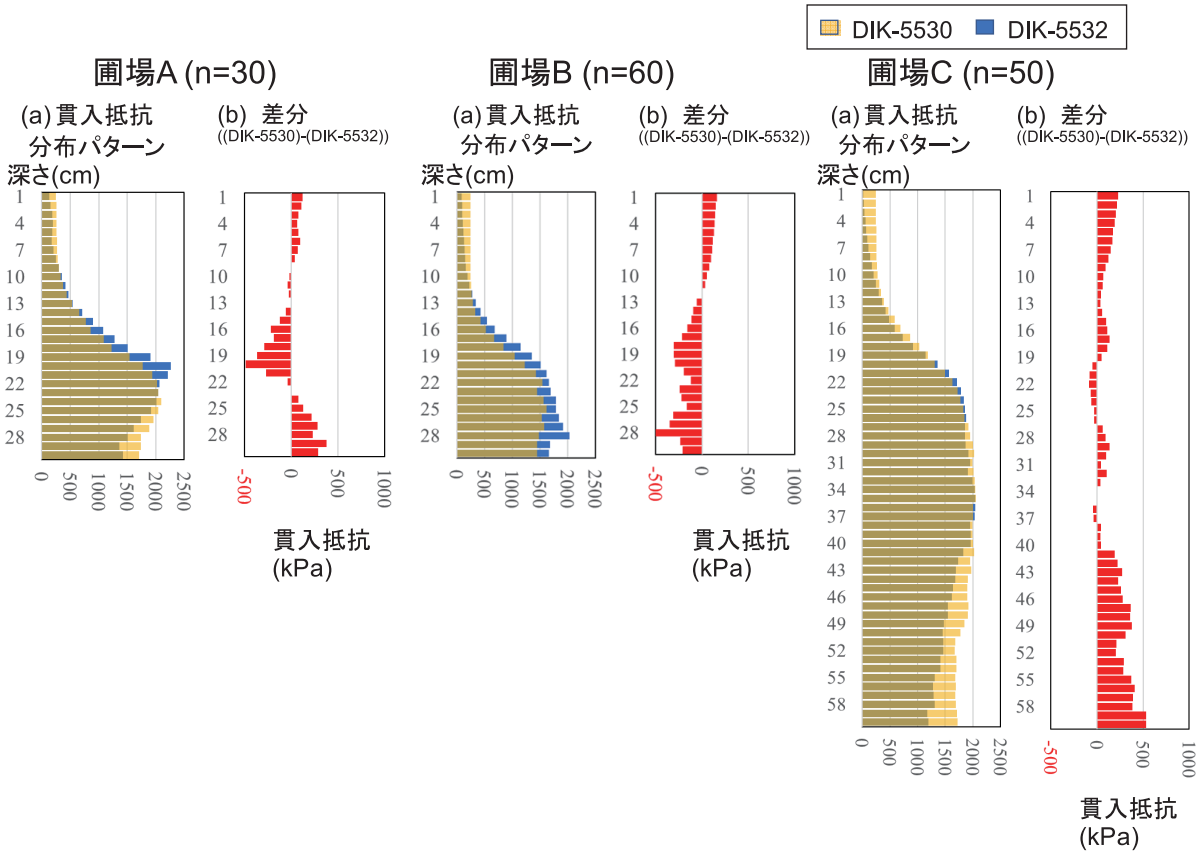


Fig. 7 圃場 A, B, C における機種による貫入抵抗分布パターンの違い.
Differences in penetration resistance distribution patterns in relation to the model used for surveying in Fields A, B, and C.

Table 1 貫入式土壌硬度計 DIK-5530（大起理化工業製）による貫入抵抗測定例.
Measurement examples of a digital cone penetrometer DIK-5530 made by Daiki Rika Kogyo Co., Ltd.

貫入抵抗値 (kPa)		調査地点 No. 58	59	60	61	62	63	64	65
深さ（cm）	1	280.38	245.00	280.38	356.21	265.22	245.00	245.00	245.00
	2	280.38	245.00	391.59	356.21	285.44	245.00	245.00	245.00
	3	300.60	245.00	391.59	376.43	305.66	245.00	245.00	315.77
	4	371.37	300.60	391.59	639.29	310.71	250.05	285.44	310.71
	5	528.08	341.04	391.59	710.06	310.71	245.00	401.70	315.77
	6	548.30	472.47	391.59	795.99	533.13	245.00	876.87	598.85
	7	548.30	523.02	437.09	795.99	866.76	250.05	1094.24	836.43
	8	614.01	674.67	790.94	795.99	1038.63	250.05	1311.60	1048.74
	9	710.06	720.17	1074.02	795.99	1154.90	250.05	1402.59	1094.24
	10	710.06	836.43	1220.61	790.94	1266.10	467.42	1549.18	1210.50
	11	962.81	942.59	1357.09	977.97	1311.60	568.52	1685.67	1352.04
	12	1094.24	1058.85	1488.52	1281.27	1483.47	664.56	1690.72	1539.07
	13	1215.56	1281.27	1534.02	1417.75	1483.47	856.65	1695.78	1594.68
	14	1266.10	1321.71	1534.02	1417.75	1483.47	1139.73	1695.78	1589.62
	15	1736.22	1407.64	1539.07	1417.75	1483.47	1483.47	1695.78	1594.68
	16	1978.86	1407.64	1534.02	1417.75	1483.47	1503.69	1690.72	1589.62
	17	2014.24	1407.64	1534.02	1417.75	1483.47	1508.74	1685.67	1594.68
	18	2049.63	1407.64	1523.91	1417.75	1483.47	1508.74	1685.67	1594.68
	19	2049.63	1407.64	1448.08	1377.31	1483.47	1508.74	1670.50	1594.68
	20	2049.63	1407.64	1341.93	1316.65	1483.47	1508.74	1645.23	1594.68

Table 2　測定データ解像度と測定時間の機種による違い.
Comparison of measurement data resolution and measurement time between models（DIK-5530 and DIK-5532）.

	測定地点数	測定して得られる貫入抵抗データ数の最大値		解像度		解像度比	測定時間			
				DIK-5530	DIK-5532	(DIK-5532)/(DIK-5530)	DIK-5530	DIK-5532	DIK-5530	DIK-5532
	地点	点		水準	水準		分 / 筆		分 / 地点	
圃場 A	30	1800	30 地点 ×60 cm	297	802	2.7	28.60	42.40	0.95	1.41
圃場 B	60	3600	60 地点 ×60 cm	447	1367	3.1	62.75	96.92	1.05	1.62
圃場 C	50	3000	50 地点 ×60 cm	442	1440	3.3	48.67	72.60	0.97	1.45
解像度：実際に得られる貫入抵抗測定値の種類数（階級の数）, 単位は「水準」								平均	0.99	1.49

で貫入抵抗値が縦方向に並べてあるが，深さ方向に同じ値が続くことがあった．また，違う調査地点 No. でも同じ値が出現することもあった．これらのことから，DIK-5530 で収集される貫入抵抗値は連続的ではなく，離散的なデータ構造と考えられる．一例として，調査地点 No. 64 で深さ 12 cm では 1690.72 kPa と読めるが，真の値は 1690.72 kPa 以上 1695.78 kPa 未満の範囲にある．圃場全面について 1 cm 刻みで深さ 60 cm まで貫入抵抗を測定すると，最大で（測定地点数 × 60）のデータ数が得られる．しかし，上述のように同じ値が繰り返し検出されることから，（測定地点数 × 60）種類にはならない．測定地点における真の貫入抵抗の最大値と最小値の範囲は DIK-5530 や DIK-5532 で測定しても等しいはずなので，圃場全面に対して得られる貫入抵抗値の種類数（階級の数）のバリエーションが多いと圃場における貫入抵抗の変化を詳細に評価できていると考えられる．イメージとして，画素数が多いディスプレイの方が詳細に画像を表現できることと類似すると考えられたため，得られる貫入抵抗値の種類数（階級の数）を解像度と定義して，DIK-5530 と DIK-5532 の表現力の相違として比較した．

各圃場における解像度を Table 2 に示す．DIK-5532 の方が DIK-5530 に比べて解像度が 2.7 から 3.3 倍も高く，貫入抵抗のわずかな変化も検出できていることが明らかになった．測定に用いた機種が違う場合は取得したデータについて真の値が含まれる範囲が異なり，データ同士を単純に比較して解析するのは避けた方が良いことが明らかになった．Fig.7 の結果からも，作土層から耕盤層，耕盤層から下層という境界領域付近の貫入抵抗値データは特に取り扱いに注意が必要である．

貫入式土壌硬度計では調査時の時間も記録されるので，調査時間について機種間の比較を行った（Table 2）．1 地点あたりの調査時間を平均すると，DIK-5530 が 0.99 分，DIK-5532 が 1.49 分と土壌物理性を測定する機器としてはデータ収集にかかる時間がとても短く，効率的に調査を行えた．しかし，DIK-5532 の方が DIK-5530 よりも 1.5 倍ほど時間がかかった．測定本体から表示器へのデータ回収は，DIK-5530 は有線であるが，DIK-5532 はブルートゥース通信で行っており，データ通信エラーの有無を確認する工程が含まれるため，余分に時間がかかったと考えられた．本研究手法のようにデータを多量に取得する場合には調査時間に大きな差が生じた．

3.3 作業者別の貫入抵抗値の比較

3.3.1 作業者別の最大貫入抵抗値および測定時間の比較

グループごとに各作業者の測定時間やデータ欠損数や操作ミス数などを Table 3 に示した．作業者別の傾向として，実際に得られる測定値の解像度は男女別で比較すると年齢が若いほど解像度が高い水準にあった．最大貫入抵抗値について，女性よりも腕力があると思われる男性の方が必ずしも大きい訳ではなかった．また，最大貫入抵抗値が一番低い人でも 3100 kPa は測定可能であった．植物根の伸長阻害が 1500 ～ 2000 kPa から始まると考えられており（北川ら, 2015; Ebato, 2020），全ての作業者が植物根の伸長阻害を確認できる範囲で測定できていた．

測定時間は 1 地点あたり平均 1.68 分で，熟練した作業者（平均 1.49 分）と比較すると，1.13 倍であり，操作に慣れることで作業効率が 13 % 程度向上できることが明らかになった．土壌が硬かったためにコーン先端が深さ 60 cm まで到達しないことも多く，欠損値が平均で 20 % 程度になっていた．内訳を見ると 50 代女性 2 名が最短で 1.41 分だったが，データ欠損や操作ミスによる「測定値なし」が $\beta 2$ で 26.3 %，$\beta 3$ で 34.2 % であった．ロッドを貫入できなかったために測定値が得られず，その分だけ測定時間が短縮されたと考えられた．一方，60 代女性 2 名の「測定値なし」は 50 台女性と大きな相違はなかったが，測定時間が 1 地点あたり約 2 分であった．原因として，タッチパネル式表示器（スマートフォンタイプ）の操作に不慣れなため，余分に時間を必要としたと考えられた．最近はスマートフォンを所有する高齢者数も増加しており，訓練によって測定時間を最も短縮できる可能性がある．

3.3.2 作業者別のコーン到達深度の比較

作業者別の貫入抵抗分布における全ての測定結果から耕盤層の範囲は深さ 18 cm から 33 cm の範囲と考えられた．これは，機種の相違による貫入抵抗分布を調査した時よりも 1 ～ 2 cm 浅いが，調査前にロータリーをか

Table 3 作業者 9 人の作業時間およびデータ採取状況.
Working time and data collection status of the nine operators

グループ番号	性別・年代	測定時間			欠損	操作ミス	測定値なし	最大貫入抵抗値	平均到達深度	平均到達深度（女性のみ）	解像度
		分 /60 地点	分 / 地点	秒 / データ	/3600	/3600	%	kPa	cm	cm	水準
α1	男 40 代	99.3	1.66	1.73	146	0	4.1	5200	57.6		2023
α2	女 40 代	90.2	1.50	1.86	694	0	19.3	5200	48.4	48.4	1727
α3	女 40 代	91.1	1.52	2.01	875	0	24.3	3900	45.4	45.4	1653
β1	男 40 代	105.7	1.76	2.26	798	0	22.2	3700	46.7		1599
β2	女 50 代	84.3	1.41	1.91	887	60	26.3	3300	44.9	44.9	1457
β3	女 50 代	84.6	1.41	2.14	1232	0	34.2	3100	39.4	39.4	1390
γ1	男 50 代	113.0	1.88	2.00	208	0	5.8	4800	56.5		1938
γ2	女 60 代	116.8	1.95	2.84	1131	0	31.4	3500	41.1	41.1	1446
γ3	女 60 代	121.4	2.02	3.07	1111	113	34.0	3400	41.2	41.2	1423
平均		100.7	1.68	2.20	787	19	22.4	4011	46.8	43.4	1628
標準偏差		14.1	0.24	0.46	386	40	11.2	831	6.5	3.4	230
最小		84.3	1.41	1.73	146	0	4.1	3100	39.4	39.4	1390
最大		121.4	2.02	3.07	1232	113	34.2	5200	57.6	48.4	2023

解像度：実際に得られる貫入抵抗測定値の種類数（階級の数）, 単位は「水準」

けたため，最初の時点に比較して整地作業によって圧密がかかった可能性があると考えられた.

Fig. 8 に作業者ごとのコーン到達深度分布を箱ひげ図で示す．すべての作業者で 50 % 以上の地点で耕盤層を通過して下層まで到達しており，50 % ～ 75 % の範囲については，α2，β3，γ2，γ3 の 4 名は少し，β1，β2 の 2 名はわずかに耕盤層下端にかかっていた．Table 3 の最大貫入抵抗値と比較すると，耕盤層を通過するには，今回の調査では 5000 kPa 程度の圧力が必要であった．「測定値なし」が少なかった α1 と γ1 は，外れ値はあるが，平均はそれぞれ 57.6 cm，56.5 cm と安定してコーンが下層まで到達していた （Table 3）．年齢が高くなると到達深度の平均値が低くなる傾向はあるが，到達深度の平均値は，全員で 46.8 cm，女性だけで 43.4 cm であった.

Fig. 9 に調査地点ごとのコーン到達深度分布を箱ひげ図で示す．すべての作業者がすべての地点で深さ 60 cm まで貫入できる圃場については，作業者ごと，深さ 1 cm ごとに土壌硬度水平分布図を作成するなど，そのまま解析できるため，新たに解析手法を考案しなくてもよい．本調査のように，作業者によって貫入できる深さがまちまちな場合は深さを設定して一義的に解析できないので，解析方法について，何らかの対策が必要である．（行 1 列 2， 4， 5， 6， 8），（行 2 列 2， 4， 5， 6），（行 3 列 2），（行 4 列 2），（行 5 列 2， 3， 5， 6， 8），（行 6 列 1， 3， 4， 5）（計 20 地点）は大多数の作業者が深さ 60 cm 程度まで貫入できていて，圃場 C の中では相対的に軟らかい地点であった．一方，（行 1 列 7），（行 3 列 8，9），（行 4 列 4），（行 5 列 9， 10），（行 6 列 9， 10）（計 8 地点）は大多数の作業者が耕盤層下部辺りまでしか貫入できず，圃場 C の中では相対的に硬い地点であった．上記地点のように，大多数の作業者で同様の傾向であれば，貫入抵抗値の大小はあるにせよ，データ解析は行いやすい.

貫入式土壌硬度計データについて作業者による相違を少なくするためには，25 % ～ 75 % のボックスが長い地点におけるデータの取り扱いを工夫する必要がある．改めて Fig. 9 を見ると，作土層と耕盤層の境界領域はすべての地点でデータ取得ができており，そのまま解析できる．一方，25 % ～ 75 % のボックスが長い地点は耕盤層の下方から下層にボックスが分布している．つまり，耕盤層を通過できないことからこのような分布が生じているので，貫入抵抗値の上限を設定し，それ以上は便宜的にすべて同じ扱いにすると，作業者による相違が出にくくなる．植物根の伸長阻害が発生する土壌硬度や本調査での作業者別の最大貫入抵抗値（Table 3）のことも含めて考慮して，上限を 3000 kPa 程度で土壌硬度三次元分布図を作成するのが使い勝手が良いと考えられた．DIK-5530 で収集できるデータの最大値は 2772.49 kPa なので，著者は貫入抵抗値上限を便宜的に 2700 kPa に設定して作図している.

3.3.3 作業者別の土壌硬度水平分布の比較

作業者別に深さ 1 cm ごとの土壌硬度水平分布についてクラスター分析した結果をデンドログラムで Fig. 10-1， 10-2， 10-3 に示す．作業者 γ3 以外の作業者 8 人

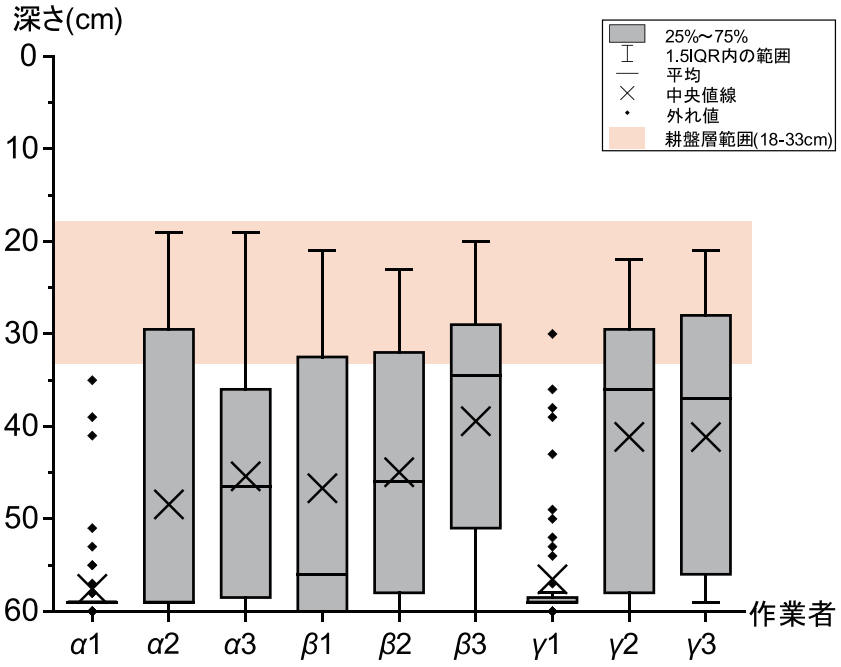


Fig. 8 圃場 C における作業者 9 人ごとの到達深度分布.
Distributions in depth of the cone tip reach for nine operators in Field C.

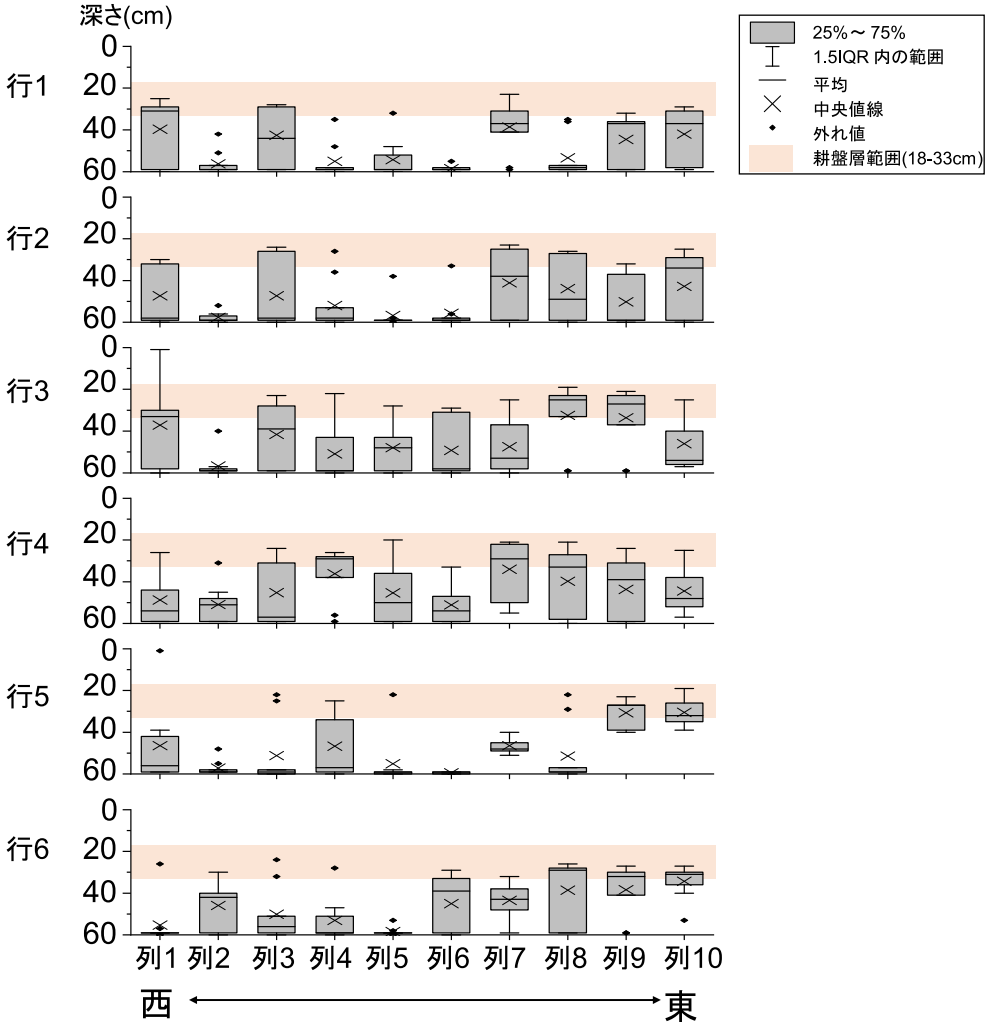


Fig. 9 圃場 C における作業者 9 人による調査地点ごとの到達深度分布.
Distributions in depth of the cone tip reach conducted by nine operators at each survey point in Field C.

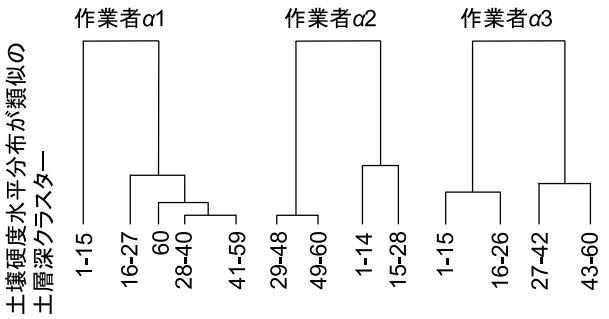


Fig. 10-1 深さ 1 cm 刻み 60 cm までの土壌硬度水平分布に関するクラスター分析結果についてグループ α のデンドログラム.
Dendrogram of Operator Group α illustrating the results of cluster analysis of the horizontal distribution of penetration resistance in steps of 1 cm up to 60 cm.

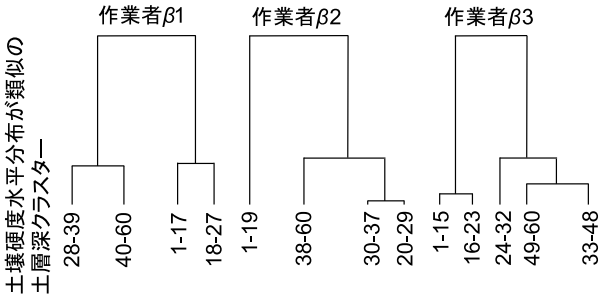


Fig. 10-2 深さ 1 cm 刻み 60 cm までの土壌硬度水平分布に関するクラスター分析結果についてグループ β のデンドログラム.
Dendrogram of Operator Group β illustrating the results of a cluster analysis of the horizontal distribution of penetration resistance in steps of 1 cm up to 60 cm.

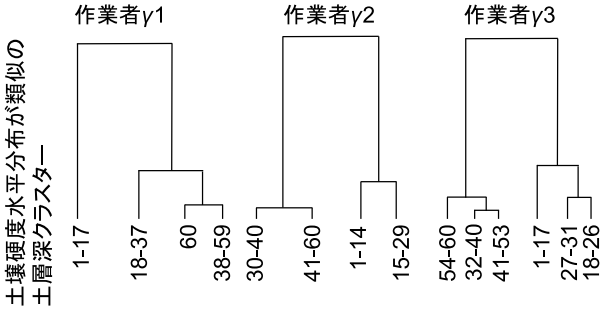


Fig. 10-3 深さ 1 cm 刻み 60 cm までの土壌硬度水平分布に関するクラスター分析結果についてグループ γ のデンドログラム.
Dendrogram of Operator Group γ illustrating the results of a cluster analysis of the horizontal distribution of penetration resistance in steps of 1 cm up to 60 cm.

において上から順に深さがまとまった状態で，4 または 5 のクラスターに分類された．作業者 γ3 は深さ 40 ～ 60 cm の範囲で 2 つのクラスターに分かれているが，それまでの深さでは他の作業者と同様の傾向であった．作業者ごとのクラスターの範囲を Table 4 に示す．作業者全員がまったく同じではなかったが，クラスター範囲が同様の傾向で分類されていることが明らかになった．第 1 クラスターは作土層，第 2 クラスターは耕盤層，第 3 クラスター以下は下層と考えられた．第 1 クラスターと第 2 クラスターの下端平均はそれぞれ 15.9 cm， 28.0 cm で，前述の耕盤層の範囲 18 ～ 33 cm とは異なっていた．耕盤層は圃場全面で均一の深さで分布しているのではなく，地点によっては多少の上下がある．さらに，作業者別にすると個人差による上下も発生する．クラスター分析では，微妙な変化を鋭敏に捉えることができたため，耕盤層の境界面を人の目で見たよりも早い段階，すなわち浅い深さで検知したと考えられた．

本調査では，作業者の能力を判断する材料として，身長と体重の聞き取り調査を行った．貫入抵抗測定時に腕の長さ（リーチ）や機器にかけられる重さが測定結果に反映されると考えたからである．個人を特定できてしまうためデータとしては示さないが，最大貫入抵抗値や到達深度等の取得データとの関係について身長 · 体重データを統計処理した．しかし，有為な相関は見られなかった．この結果について，解析を行うには調査人数が少なかった可能性，もしくは，調査時における具体的な生理的データ（筋力や血圧，心拍数等）が必要だった可能性が考えられた．

デンドログラムを作業者間で比較すると，大きく 2 つのグループに分けられることが明らかになった．第 1 クラスターが一番離れている作業者グループ（α1， β2， γ1）と第 1 クラスターと第 2 クラスターが近い作業者グループ（α2， α3， β1， β3， γ2， γ3）である．作業者別に取得データを比較する試みを初めて行ったこともあり，定量的なデータを取得する準備ができていなかったため定量的なデータとしては存在しないが，α1，β2，γ1 に共通して見られたのは，深さ 60 cm まで貫入させようという強い意志を持って作業していたことであった．そのことにより，力みが生じ，軟らかめの作土層から硬めの耕盤層を突き抜けるときに大きな衝撃を受けたため，作土層と耕盤層に大きな相違が出たと考えられた．さらに，α1 と γ1 は深さ 60 cm で単独のクラスターになっており，60 cm まで力強く貫入した衝撃が伝わって別のクラスターになったと考えられた．また，β1 は第 1 クラスター下端が他の作業者と比較して深い位置になっていた．以上のことより，貫入式土壌硬度計で測定するにあたり，力強い男性が 60 cm までしっかりデータを取得しようと頑張って作業すると力みが生じ，耕盤層の始まり位置あたりで余分な力がかかってしまう．逆に女性や高齢者は非力なので，ゆっくりしか貫入できないが，そちらの方が，作土層から耕盤層の変化をスムーズに検知できることが明らかになった．今後同様な調査を行う場合には作業者に筋力や血圧，心拍数などの生理的データを取得できるセンサを装備すると，作業者ごとの力みについて定量的な比較が可能になると考えられた．

貫入式土壌硬度計の貫入速度は 1 cm s^{-1} が目安であり（梅村, 1984; 土壌環境分析法編集委員会, 1997），体感

Table 4 深さ 1 cm 刻み 60 cm までの土壌硬度分布のクラスター分析結果について作業者間の比較.
Comparison between the nine operators on the results of a cluster analysis of the horizontal distribution of penetration resistance in steps of 1 cm up to 60 cm.

グループ番号	性別・年代		第 1 クラスター	第 2 クラスター	第 3 クラスター以下			
			深さ cm	深さ cm	深さ cm			
α1	男	40 代	1–15	16–27	28–40		41–59	60
α2	女	40 代	1–14	15–28	29–48		49–60	
α3	女	40 代	1–15	16–26	27–42		43–60	
β1	男	40 代	1–17	18–27	28–39		40–60	60
β2	女	50 代	1–19	20–29	30–37		38–60	
β3	女	50 代	1–15	16–23	24–32	33–48	49–60	
γ1	男	50 代	1–17	18–37			38–59	60
γ2	女	60 代	1–14	15–29	30–40		41–60	
γ3	女	60 代	1–17	18–26	27–31	32–40	41–53	54–60
クラスター下端		平均	15.9	28.0	38.6			
		標準偏差	1.69	3.84	5.45			
		最小	14	23	31			
		最大	19	37	48			

的にはかなり遅い．土壌物理性調査について全くの素人で女性や高齢でも許容できる範囲でデータ収集ができたため，一時雇用で多くの作業者を投入して大量の貫入抵抗データを取得するのは可能であると思われた．測定ミスや操作ミスも多く発生するので，貫入式土壌硬度計の癖や取得されるデータの傾向を理解した上でデータ整理および解析を行う必要はある．

4. おわりに

本研究では，貫入式土壌硬度計の定量的な利用を進めるための基礎的な知見として，機種および作業者の相違によってもたらされる貫入抵抗値データの変動や分布についての傾向を解析した．その結果，貫入式土壌硬度計の機種が異なる場合，耕盤層上部や下部の境界領域における貫入抵抗データの取得状況が機種依存になるため，安易にデータ比較ができないことが明らかになった．今回使用した貫入式土壌硬度計はロッドの長さを 60 cm，90 cm と設定して，その深さまで貫入抵抗値を 1 cm 刻みで収集できる．作業者は測定地点あたり 60 点，90 点のひとまとまりのデータセットになるような貫入抵抗値の取得を目標としてロッドを土壌に押し込んでしまいがちだが，その力みが取得データに反映されることも明らかになった．男性が力強くデータ収集するよりは，非力な女性や高齢者がゆっくりとロッドを貫入させた方が作土層から耕盤層へ変化する境界面の貫入抵抗データを適正に収集できると考えられた．腕力がある人ほどロッドの貫入に注意を払う必要がある．

今回の調査条件は土壌硬度が年間で一番高く，貫入抵抗の測定には一番条件が厳しかった．すなわち，測定機器の仕様よりも作業者個々の能力（身体能力だけなく，測定時の判断や臨機応変さ等も含む）の方が取得データに反映されやすい状況であった．したがって，今回の調査で得られた最大貫入抵抗値や到達深度についてすべての作業者が達成可能な範囲を特定することで，簡易版貫入式土壌硬度計の開発に繋がる．DIK-5532 は最大貫入抵抗値 10 MPa, 最大深度 90 cm まで測定できる仕様になっている．一方で，安西（2016）によると，スコップ 2 堀りで誰でも土の状態を診断できるとしており，圃場の状態を把握するだけならば，DIK-5532 のような研究者向けの特別な仕様は必要ない．耕盤層の深さや厚さ，植物根の伸長できる土壌硬度等も考慮すると，貫入式土壌硬度計について必要最低限の仕様として，貫入抵抗 3000 kPa 程度，深さ 45 cm 程度まで測定できれば，貫入式土壌硬度計での測定経験のない作業者集団でも圃場全体の土壌硬度三次元分布図を作成するのに必要なデータを収集できると考えられた．貫入式土壌硬度計を上記の仕様にするメリットとして，生産コスト削減により，販売価格も低く設定できる．それによって貫入式土壌硬度計の普及が進み，研究者や農業関係者が手軽に使用できる機器になる．

今回の結果から，多くの作業者が貫入式土壌硬度計を用いて貫入抵抗を測定する場合に比較的均質なデータを収集するための条件を提示できたが，日本の耕地面積だけでも 437 万 ha（平成 2 年現在）と広大で，人力によるデータ収集には限界がある．大起理化工業株式会社では，2019 年より自動で貫入抵抗値と土壌水分を測定するロボットの開発を始め，農研機構 中央農業研究センターと共同で実用化に取り組んだ（大起理化工業株式会社, 2020）．GNSS を活用して完全自動で貫入抵抗値と土壌水分を測定するにはいくつかハードルがあるが，近いうちに実現できると考えている．上述のロボットが稼働す

るようになると，貫入抵抗データを効率良く，しかも再現性があるように収集できるので，農耕地における三次元的な貫入抵抗（土壌硬度分布）のデジタルマップ作成が加速化される．ただし，ロボットは臨機応変な対応が苦手なので，データ収集できる圃場に制限が出てくるはずである．そのような状況に対応して，本研究で得られた知見を基に，研究や農業には縁のなかった人々が人力で貫入抵抗データの収集作業を補完し，土壌物理性も考慮した作物生産に貢献できることを期待している．

謝辞

本研究は，農研機構 中央農業研究センター 谷和原水田圃場 業務科職員 3 名，および契約職員 6 名の皆様に多大なるご協力をいただき，データ収集することができました．また，大起理化工業株式会社 代表取締役 大石正行博士，営業部部長 齋藤智則氏は，本研究の趣旨を理解し，快く貫入式土壌硬度計に関する情報を提供してくださいました．皆様に心から感謝申し上げます．

引用文献

安西徹郎 (2016): だれにでもできる 土の物理性診断と改良, pp. 1–95. JA 全農肥料農薬部編, 農山漁村文化協会, 東京.

大起理化工業株式会社 (2018): DIK-5532 デジタル貫入式土壌硬度計. https://www.daiki.co.jp/wp/wp-content/uploads/2021/03/5532.pdf（2021 年 6 月 18 日）

大起理化工業株式会社 (2020): DIK-500R 土壌硬度・水分計測ロボット. https://www.daiki.co.jp/products/dik-500r/（2021 年 6 月 18 日）

Dixon R.M. (1975): Design and use of closed-top infiltrometers. Soil Science of American Proceedings, 39: 755–763.

土壌物理性測定法委員会編 (1972): 土壌物理性測定法, pp. 168–190. 養賢堂, 東京.

土壌環境分析法編集委員会 (1997): 土壌環境分析法, pp. 36–38, pp. 48–66. 博友社, 東京.

Ebato, M. (2020): Evaluation of soil hardness in paddy fields by cone penetrometer as a simple soil physical diagnosis method. Agricultural Information Research, 29(1): 24–39.

江波戸宗大 (2020): デジタル貫入式土壌硬度計を用いた土壌物理性簡易診断方法. 作物生産と土づくり（旧 圃場と土壌）, 53: 71–76.

Eijkelkamp Soil & Water (2014): PENETROLOGGER OPERATING INSTRUCTIONS. https://www.vanwalt.com/pdf/information-sheets/penetrologger-cbr-operating-instructions.pdf（2021 年 6 月 18 日）

福本昌人 (2013): 直径 45 cm の円筒を用いたシリンダーインテークレート 試験による転換畑の排水性評価. 農工研技報, 214: 209–220.

東山 勇 (1974): Atterberg Limits の工学的意義. 土壌の物理性, 30: 23–28.

Humboldt Mfg. Co. (2015): Digital Static Cone Penetrometer. https://www.humboldtmfg.com/manuals/HS-4210_MAN_0815.pdf（2021 年 6 月 18 日）

今園支和 (1991): 水田の大区画化と直播栽培. 東北農業研究, 別号 4: 5–19.

地盤工学会 (2010): 土質試験 基本と手引き 第二回改訂版, 第 5 章 土の液性限界・塑性限界試験, pp. 39–48. 丸善, 東京.

気象庁 (2018): 気候変動監視レポート 2018. https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_all.pdf（2021 年 6 月 18 日）

北川 巌 (2005): 積雪寒冷地における排水改良の現状と今後の展開. 土壌の物理性, 100: 43–53.

北川 巌, 塚本康貴, 竹内晴信 (2015): 基盤整備圃場の適切な生産性を確保する土壌物理性管理指標. 農業農村工学会, 83: 363–366

前田 隆, 相馬尅之 (1974): 土のコンシステンシーに影響をおよぼす因子について. 土壌の物理性, 30: 15–22.

松井 巌, 藤井芳一, 佐々木美佐子, 柿崎博之, 森田 泉, 田口辰雄 (1987): 樹園地土壌診断への貫入式土壌硬度計の応用. 秋田県果樹試験場研究報告, 18: 15–22.

望月秀俊, 藤本 寛, 清水裕太, 高橋英博, 松森堅治 (2016): 岡山県南部地域の乾田直播少量播種栽培における貫入式土壌硬度計による苗立ち予測法の開発. 土壌の物理性, 133: 11–18.

長野間宏 (1995): 大区画化に伴う栽培管理上の問題点. 農業土木学会誌, 63: 921–924.

中野恵子, 宮崎 毅, 中野政詩 (1998): 畑地の排水性から見た土壌の物理的肥沃度. 農業土木学会論文集, 195: 101–112.

中津智史, 東田修司, 沢崎明弘 (2004): 耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破砕による対策. 日本土壌肥料学雑誌, 75: 265–268.

農林水産省 (2020): 食料・農業・農村基本計画.

農林水産省 (2021a): 農業労働力に関する統計. https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08（2021 年 6 月 18 日）html#1（2021 年 6 月 18 日）

農林水産省 (2021b): 2020 年農林業センサス結果の概要（確定値）（令和 2 年 2 月 1 日現在）. https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/noucen/2020/index.html（2021 年 6 月 18 日）html#1（2021 年 6 月 18 日）

農林水産省農村振興局 (2021): 国営農地再編整備事業実施要綱. http://www.pref.tochigi.lg.jp/g07/documents/r3kokueinoutisaihennyoukou.pdf（2021 年 6 月 18 日）

R Core Team (2020): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/（2021 年 6 月 18 日）

酒寄貴範, 長谷川周一, 中野明正, 加藤英孝, 河野英一 (1998): 負圧浸入計を用いた畑土壌の不飽和透水係数の測定. 日本土壌肥料学雑誌, 69: 386–394.

高橋智紀, 岡 紀邦, 江波戸宗大, 望月秀俊, 中野恵子 (2021): 圃場オンサイト計測による簡易な土壌物理性診断の標準作業手順書. pp. 22–28. 農研機構標準作業手順書 (SOP) https://www.naro.go.jp/publicity_report/

publication/laboratory/naro/140577.html（2021 年 9 月 5 日）
内田多喜生 (2008): 農地集積の動向と課題. 農林金融, 2008 年 2 月号: 58–69.
梅村 弘 (1984): 貫入抵抗計（診断の基本）, 農業技術大系土壌施肥編 第 4 巻, pp. 基本 +198–基本 +201. 農山漁村文化協会, 東京.
吉田武郎, 増本隆夫, 堀川直紀（2012): 農村工学研究所内における総合気象観測システムの構築とそのデータ品質管理. 農村工学研究所技報, 212: 43–52.

要　　旨

貫入式土壌硬度計の定量的な利用を進めるため，機種および作業者の相違によってもたらされる貫入抵抗値データの変動や分布についての傾向を解析した．圧力検出機構の相違で耕盤層上部や下部の境界領域で得られる貫入抵抗値が機種に依存していた．機種間のデータ比較には注意が必要であることが明らかになった．9 名の作業者が 31 a 圃場全面で 60 点ずつ調査を行った．作業者の性別や年齢は以下の通りである；40 代男性 2 名 · 女性 2 名，50 代男性 1 名 · 女性 2 名，60 代女性 2 名．力強い男性よりも非力な女性や高齢者がゆっくりとコーン先端を貫入させた方が作土層から耕盤層へ変化する境界面の貫入抵抗データを適正に収集できていると考えられた．貫入抵抗 3000 kPa，深さ 45 cm まで測定できれば，土壌硬度三次元分布図を作成するのに必要なデータを収集できると考えられた．

キーワード：貫入式土壌硬度計，貫入抵抗，到達深度，作業者，水田