

リンゴ園地における施肥後の土壌環境の「見える化」とその評価

誌名	農業農村工学会論文集
ISSN	18822789
著者名	加藤,幸 遠藤,明 千葉,克己 溝口,勝
発行元	農業農村工学会
巻/号	303号
掲載ページ	p. II_95-II_102
発行年月	2016年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



リンゴ園地における 施肥後の土壌環境の「見える化」とその評価

加藤 幸* 遠藤 明* 千葉克己** 溝口 勝***

* 弘前大学農学生命科学部, 〒036-8561 青森県弘前市文京町3

** 宮城大学食産業学部, 〒982-0215 宮城県仙台市太白区旗立2-2-1

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科, 〒113-8685 東京都文京区弥生1-1-1

要 旨

多雪地帯のリンゴ園では、融雪浸透水による肥料成分の溶脱を懸念し春の施肥を推奨する傾向が高い。施肥効果の検証には、土壌溶液 EC や土壌水分量、地温といった園地の土壌環境の把握のため、土壌センサの利用が有効である。本研究では、青森県北津軽郡鶴田町のリンゴ園を対象に6年間にわたって土壌センサとフィールドモニタリングシステム(FMS)を活用したモニタリングを行った。その結果、1) 秋肥は積雪期間中、土壌中に保持され、比較的気温の高い日に融雪水の浸透に伴い移動することを確認した。雪が完全に消えた時期の土壌溶液 EC は施肥前の状態に戻っていた。2) 春肥は強い降水により急激な移動を示す場合と、降水量が少ない場合に地表付近に残留する場合があった。3) 土壌センサの活用により施肥後の土壌環境変化が「見える化」され、施肥に関する農家の意志決定を支援することができた。

キーワード：リンゴ園地、施肥、モニタリング、土壌溶液 EC、土壌センサ

1. はじめに

リンゴなどの落葉果樹類の施肥は、休眠期間中(11~3月頃)に基肥を行い、追肥を6~7月に行うことが多い(杉浦, 2004)。一方、落葉果樹類は秋の収穫後から落葉時期に光合成を盛んに行い、翌年の花芽を形成させる(佐藤, 2000)ため、秋季の施肥(以下、「秋肥」とする)が検討されることも多い。秋肥については、冬期間の溶脱を考慮した施肥方法の検討を行った研究(上田ら, 1993)や、有機系肥料の利用で多雪地帯のリンゴ園でも収穫後の施肥効果が高いとする研究例(坂本, 2006)も見られる。しかし、秋の収穫後から積雪で園地が閉ざされる青森県などの多雪地帯では、冬期間の融雪浸透水による肥料成分の溶脱を懸念し、春季の施肥(以下、「春肥」とする)を推奨する傾向にある(青森県, 2008; 加藤ら, 2012; 水谷ら, 2002)。

施肥の効果を検証するためには、生産現場における施肥時期や方法などを変えた実験的な取り組みを行うとともに、それら条件下における肥料成分の溶脱や土壌水分の変化などを把握することが必要である。また、土壌溶液の電気伝導度(以下、「EC」とする)や土壌水分量、地温といった土壌環境の変化を把握するためには、土壌センサの利用が有効である。しかし、土壌センサを利用して土壌水分や土壌溶液 EC などの正確な数値を把握するためには、複雑な校正実験がその都度必要となる。これに関し、三石・溝口(2014)および武藤ら(2015)は様々な土壌センサに関するキャリブレーションから校正式を提示すると同時に、

土壌水分と EC に関する簡便な校正法を示している。さらに、営農上の実利用という観点からすれば、簡便な校正法によって土壌環境の「見える化」を行うことも重要である。すなわち、土壌センサを利用した土壌環境変化の把握には、正確な数値の把握という側面と、生産現場での実利用に即した形での土壌環境変化の「見える化」という二つの側面が存在するといえる。

本研究では、リンゴ園地での6年間のモニタリングから土壌環境変化の「見える化」を進めるとともに、調査園地での施肥と土壌溶液 EC の関係について検討した。そのうえで、様々な条件で行われた施肥後の土壌水分の状態と EC の変化を把握し、園地の土壌環境の把握と実利用に即した土壌センサの活用方法を提案した。

2. 対象と方法

2.1 調査対象と項目

青森県北津軽郡鶴田町のリンゴ園地を調査対象とした。対象とする品種は青森県の主力品種である「ふじ」で、園地内のリンゴ樹のうち総合的病害虫・雑草管理(IPM)に使用する代表木周辺を調査対象とした。この園地は平場であり、調査箇所周辺の高低差は数 cm 程度で、ほぼ水平と判断される。調査にあたり、土壌センサ(Decagon 5TE)を対象木の主幹から水平方向に半径 1m の位置に設置した。これは、根が主幹から約 1m の範囲に分布しており、施肥もこの位置を中心に地表散布するという園主への聞き取り結

果にもとづいた。この状況は、黒田・千葉 (2006) が示した樹齢 13 年生の根系分布の特性とも合致しており、センサの設置箇所が樹根の平面分布を捉えているといえる。また、代表木周辺は平地であることから、調査箇所では、側方流出は微少で、降下浸透が中心と想定される。リンゴは台木を用いた接ぎ木により栽培されることが多く、根系は数 m にも及ぶことも考えられる。一方、生育に大きく影響を及ぼす主要な根群域は園主への聞き取りによれば 50~60cm 程度としていた。青森県では園地での土壌改良の目標を 60cm 以上としている (青森県, 2008) ほか、斉藤ら (1985) は、土壌タイプの異なるリンゴ園の有効根群域の土壌水分環境に関し 60cm 深までを対象に検証している。加えて、調査園地で更新のため掘り起こされた古いリンゴ樹の根系分布を調査したところ、主要な根の大半が 60cm 程度の深さにあることを確認した。

本研究はこれをもとに、園地の土壌断面を地表面から約 70cm まで観察し、一層の褐色黒ボク土 (2.5Y 2/1) で構成されていることを確認した。さらに、園地の気象、土壌環境を調査するため、気象計 (Davis Vantage Pro2) と土壌センサ (Decagon 5TE) を設置した。土壌センサは対象の深さを網羅するよう、8, 16, 32, 64cm 深に設置し、地温、体積含水率 θ , EC についてフィールドモニタリングシステム (FMS) (溝口, 2012) を活用しモニタリングした。モニタリング調査は 2009/11/11 に開始し継続中である。

モニタリング地点の土壌の理化学的性質を把握するため、2014/8/12 に深度 0~20cm, 20~40cm, 40~60cm から 100mL 円筒コアサンプルおよび攪乱土を採取した。それらサンプルを活用し、基礎的な土壌物理性の測定と、土壌の pH (1 : 2.5 土壌水抽出液を用いたガラス電極法), EC (1 : 5 土壌水抽出液を用いた電気伝導率法) の測定を行った。さらに、1 : 5 土壌水抽出液中の NO_3^- および NH_4^+ の定量をイオンクロマトグラフ法 (ICS-90, Dionex) により行った。

2.2 土壌センサの校正

内径 5cm, 高さ 12.7cm のアクリル円筒 (体積 250cm³) に (1) 式に示す質量 M (g) の園地の攪乱土を充填し、土壌センサ (Decagon 5TE) 全体を挿入した。

$$M = V_e \rho_d (1 + \omega) \quad (1)$$

ここで、 V_e : アクリル円筒の体積と土壌センサの体積との差で表される土壌有効体積 (= 237 cm³), ρ_d : 園地土壌の乾燥密度 (g cm⁻³), ω : 園地の含水比 (g g⁻¹) である。

土壌センサを挿入した土壌円筒を底面から毛管上昇により水分飽和させた。その後、円筒を水平に電子天秤に載せ、両面が蒸発条件になるようにした。その後、乾燥過程におけるセンサの出力値から得た土壌のバルク誘電率 ϵ_b と質量から得た θ の関係を測定した (Fig. 1)。Topp et al. (1980) の ϵ_b - θ の関係とは大きく異なっていたが、三石・溝口 (2014) が孺恋村の黒ボク土から得た Mitsubishi-Mizoguchi の式 (三石・溝口, 2014) と近似した。実験から得た近似式と Mitsubishi-Mizoguchi の式を Table 1 に示した。本研究では、実験から得た近似式に比べ適用範囲の広い、Mitsui-

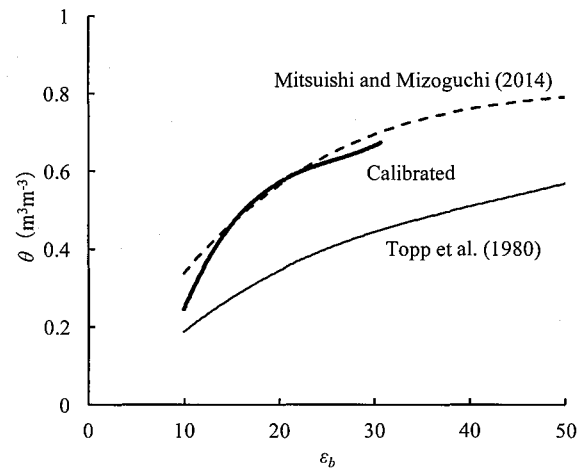


Fig. 1 土壌センサ STE の校正曲線
Calibrated curve of STE

Table 1 校正式の係数

Parameters for the calibrated functions		
$\theta = a \times \epsilon_b^3 + b \times \epsilon_b^2 + c \times \epsilon_b + d$		
	Calibrated	Mitsubishi and Mizoguchi (2014)
a	6.583×10^{-5}	5.036×10^{-6}
b	-5.093×10^{-3}	-7.770×10^{-4}
c	1.390×10^{-1}	4.230×10^{-2}
d	-6.971×10^{-1}	-1.025×10^{-2}
R^2	0.999	0.980

(R^2 : Coefficient of determination)

Mizoguchi の式 (三石・溝口, 2014) を校正式とした。

また、(2) 式の Hilhorst (2000) の式にもとづき土壌間隙水の EC (σ_p) と土壌のバルク EC (σ_b) の関係をもとめた。

$$\sigma_p = \epsilon_p \sigma_b / (\epsilon_b - \epsilon_{\sigma_b=0}) \quad (2)$$

ここで、 σ_p : 土壌間隙水の EC (dS m⁻¹), σ_b : 土壌のバルク EC (dS m⁻¹), ϵ_p : 土壌間隙の誘電率, ϵ_b : 土壌のバルク誘電率, $\epsilon_{\sigma_b=0}$: 土壌のバルク EC が 0 になるときの誘電率である。5TE の使用マニュアル (Decagon Devices, Inc., 2016) によれば、出力される σ_b は 25°C に調整されている。そのため、ここでは直接的な温度補正は行わなかった。また、 ϵ_p および ϵ_b は、次式 (Decagon Devices, Inc., 2016) によった。

$$\epsilon_p = 80.3 - 0.37(T_{soil} - 20) \quad (3)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_{RAW} / 50 \quad (4)$$

ここで、 T_{soil} は測定時の地温, ϵ_{RAW} は 5TE の出力値である。また、 $\epsilon_{\sigma_b=0}$ について Hilhorst (2000) は 4.1, 5TE の使用マニュアル (Decagon Devices, Inc., 2016) では 6.0 としている。黒ボク土に関しては 5~7 (登尾ら, 2005) とする例もみられる。ここでは、前述の校正実験における 5TE の出力値から得た ϵ_b と σ_b の関係を線形近似し $\epsilon_{\sigma_b=0} = 7.9$ とした。さらに、土壌溶液 EC を (5) 式 (Decagon Devices, Inc., 2016) からもとめた。

$$SolutionEC = \{ \sigma_p \theta + \sigma_d (\phi - \theta) \} / \phi \quad (5)$$

なお、 σ_d は蒸留水の EC で、ここでは 0 とした。 ϕ は間隙率

Table 2 土壌の理化学性
Physical and chemical properties of soil

Depth (cm)	Soil Classification	Particle Density ρ_s (g cm ⁻³)	Bulk Density ρ_d (g cm ⁻³)	Water Content (m ³ m ⁻³)	Saturated Hydraulic Conductivity (cm s ⁻¹)	pH _{1:2.5}	EC _{1:5} (dS m ⁻¹)
0~20	SL	2.27	0.59	0.50	3.27×10 ⁻³	5.87	0.21
20~40	SL	2.14	0.52	0.68	1.05×10 ⁻⁴	5.55	0.13
40~60	SL	2.23	0.49	0.76	1.58×10 ⁻⁴	5.15	0.10

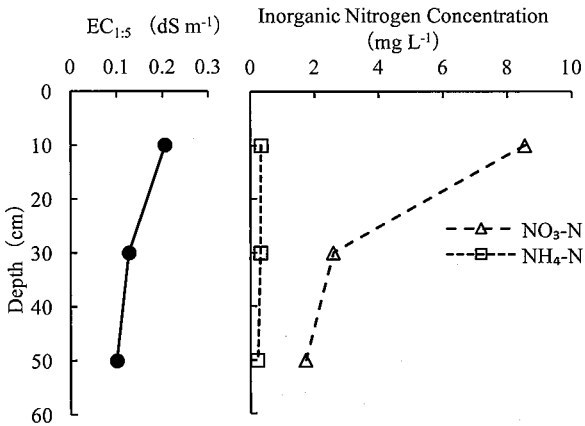


Fig. 2 EC_{1:5} と NO₃-N, NH₄-N の鉛直分布

Profile of EC_{1:5}, Nitrate nitrogen (NO₃-N) and Ammonium nitrogen (NH₄-N)

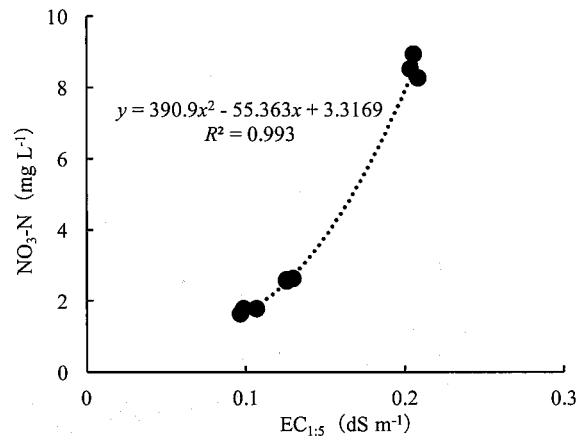


Fig. 3 EC_{1:5} と NO₃-N の関係

Relationship between EC_{1:5} and Nitrate nitrogen (NO₃-N)

で **Table 2** の ρ_s と ρ_d から θ を 0.75 とした。 σ_p および θ については (2) 式および **Table 1** の校正式よりもとめた。

2.3 施肥後の土壌環境の把握と土壌センサの利用

土壌センサを利用し、施肥後の土壌環境変化を把握するには、正確な数値の計測という側面と、営農上の実利用に即した形で土壌環境を「見える化」し、全体的な傾向を把握するという二つの側面が存在する。簡便性から考えれば土壌のバルク EC (σ_b) から傾向が把握できればもっとも容易である。一方で、正確な土壌環境の把握には、土中から直接採水した水試料に対する土壌間隙水 EC (σ_p) の測定や 1:5 土壌水抽出液に対する土壌溶液 EC (Solution EC) の測定が欠かせない。また、土壌溶液の pH やイオン組成を把握することも重要といえる。

本研究では、農家と連携した実際の園地での長期間のモニタリングからデータを蓄積し、相対的な EC の変化傾向を把握することを目的としている。加えて、今後の展開として、土壌センサ設置箇所から直接抽出した土壌溶液の分析を進めることで施肥後の土壌環境の定量的な検討を進める予定にしている。そのため、本報では σ_b を土壌溶液 EC (Solution EC) に変換したうえで検証を進めることとし、以下では EC と略記することとした。

3. 結果と考察

3.1 リンゴ園土壌の理化学的性質

各深度における園地土壌の理化学的性質を **Table 2** に示

した。土粒子密度は 2.14~2.27g cm⁻³ の範囲にあった。乾燥密度は地表付近 (0~20cm) が深部 (40~60cm) に比べ大きく 0.59g cm⁻³ であった。地表付近と深部の飽和透水係数は、それぞれ 3.27×10⁻³cm s⁻¹ と 1.58×10⁻⁴cm s⁻¹ であり、表層ほど透水性が良好であることが分かった。サンプリングした時点での体積含水率 θ は、地表付近が 0.50m³m⁻³、深部が 0.76 m³m⁻³ で、深部ほど水分量が多かった。飽和時の θ は地表付近から 0.65, 0.74, 0.78m³m⁻³ であった。サンプリングの直前 (2014/8/5~8/11) に約 200mm の降水があったため、飽和に近い状態にあったといえる。

土壌の pH は 5.15 から 5.87 の範囲にあった。1:5 法から得た EC_{1:5} は地表付近 (0~20cm) で高く 0.21dS m⁻¹ で、深くなるほど減少傾向にあり 20~40cm で 0.13dS m⁻¹、40~60cm で 0.10dS m⁻¹ であった。サンプリング時の土壌溶液 EC は、16, 32, 64cm 深で 0.30, 0.18, 0.11dS m⁻¹ であった。EC_{1:5} は各層の平均的な値であることから、両者は概ね一致した傾向にあるといえる。また、**Fig. 2** に EC_{1:5} と NO₃-N, NH₄-N の鉛直分布を示した。NH₄-N に比較し、NO₃-N の濃度がきわめて高い。また、**Fig. 3** から EC_{1:5} と NO₃-N の間に高い相関性があることが確認された。

3.2 調査園地の施肥と土壌水分, EC の変化

調査園地では、2009 年から 2015 年の 6 年間で **Table 3** に示す Case 1 から Case 5 の計 5 回の施肥が行われていた。この園地では、従来、秋肥を中心とした考え方をしているものの、ここ数年は降雪時期が比較的早かったこともあり春肥が中心となっていた。施肥は前述した根系の平面分布

Table 3 調査園地での施肥日と使用肥料
Dates of fertilization and applied fertilizer

Fertilization	Date	Applied Fertilizer
Case 1	2009/11/9	<i>Ise-Green</i> (Ise Fram Tohoku Co.)
Case 2	2010/12/10	<i>Ise-Green</i> (Ise Fram Tohoku Co.)
Case 3	2012/6/2	<i>Ise-Green</i> (Ise Fram Tohoku Co.)
Case 4	2014/6/10	unkown
Case 5	2015/5/7	<i>Daiya-Amino</i> (MC FERTICOM Co.)

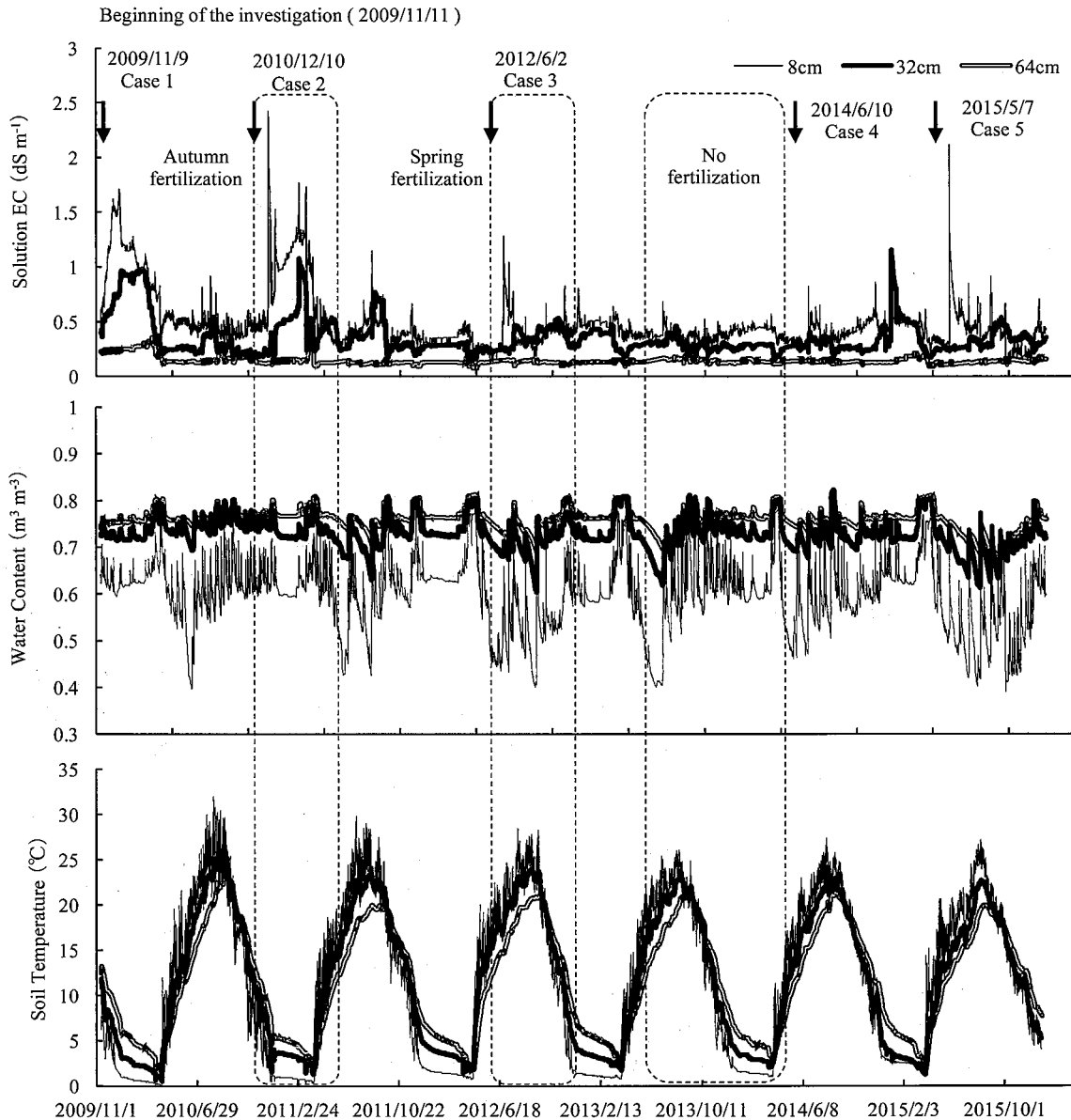


Fig. 4 2009/11~2015/12 における調査園地の EC, 体積含水率と地温

Electrical conductivity, volumetric water content and soil temperature in investigated orchard (Nov.2009 – Dec.2015)

をふまえ、主幹から約 1m の範囲に円状に地表散布していた。Fig. 4 に調査園地の土壌における EC と体積含水率 θ 、地温の変化を示した。各施肥について、図中に施肥日を矢印で示した。このうち、Case 1 は 2009 年のモニタリング調査開始直前の 11/9 に実施されていた。2014 年の Case 4 は、

他の園地に散布した余剰肥料を施肥しており、肥料名や施肥量が不明確であった。2015 年の施肥 5 は従来使用していた有機系肥料からアミノ系肥料に変更していた。本報告では同一の有機系肥料（イセグリーン）を施肥していた Case 2 と Case 3 に着目した。使用した肥料（イセグリーン）の

Table 4 使用した肥料 (イセグリーン) の成分

Fertilizer components (Ise-Green)						
Water content	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	C/N ratio	pH
13.91%	3.10%	4.64%	3.24%	19.88%	7.2	8.5

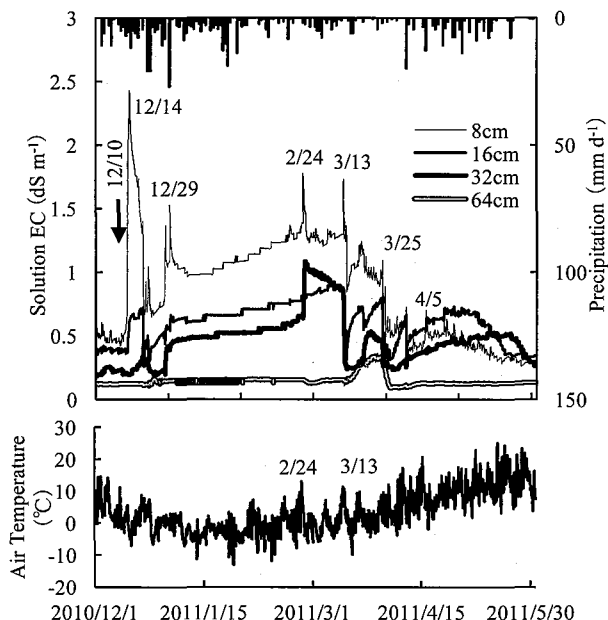


Fig. 5 秋肥 (12/10) 後の EC 変化 (2010~2011)

Changes of electrical conductivity after fertilizing on Dec.10.2010

成分を Table 4 に示した。

Fig. 4 をみると、体積含水率 θ は 64cm 深で 0.7 以上の値で推移しているのに対し、地表付近 (8cm 深) は 0.4~0.7 の範囲で変動し、地表から深部に至るほど湿润傾向にあった。また、調査園地では年間を通じて 6 月に土壤が乾燥する傾向にあった。

地温は 8cm 深では日単位での変動が大きく、64cm 深では季節ごとの変化が中心であった。冬期は積雪による保温効果から外気温が -10°C を下回っても 8cm 深では $0.5\sim 2^{\circ}\text{C}$ 、64cm 深では $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ の範囲に保持されていた。3 月下旬に融雪水の浸透により地温分布が大きく変化した。4 月上旬から 9 月上旬にかけて地表付近 (8cm) が高く、9 月中下旬から 4 月初旬にかけて深部 (64cm) の地温が高かった。

施肥後の各深さの EC の変化を見ると地表から深部に肥料成分が降下浸透している様子が確認できた。一方、各施肥で EC の変化傾向に違いが見られるほか、施肥をしていない時期にも EC の変化が生じていた。このうち、Fig. 4 中の点線枠で示す 2010/12/10 の Case 2 (秋肥) から半年間と 2012/6/2 の Case 3 (春肥) から半年間の EC の変化に着目した。また、1 年以上施肥が行われていない 2013/6~2014/5 を無施肥期間の EC と考えた。

3.3 秋肥後の EC の変化

秋肥 (Case 2) 後の EC と降水量、気温 (2010/12~2011/5)

に着目した図を Fig. 5 に示した。この園地では 2010/12/10 に Table 4 のイセグリーン (15kg/樹体 1 本) を地表散布していた。Fig. 5 で 8~32cm 深において、深さごとに生じる濃度ピークの時間差から肥料成分の鉛直方向への移動を確認することができる。

施肥 (12/10) 直後の園地では、降雪と融雪が繰り返され、融雪水の浸透で 12/14 に 8cm 深で、この期間の EC の最大値である 2.3dS m^{-1} を示した。その後、積雪が継続する根雪 (12/29) の状態となるまでの期間は変動が激しかった。それ以降、降水 (降雪) は見られるものの、積雪によって EC への影響は小さくなった。その後、2011/2/24、3/13 に大きな変動が見られた。両日の降水量は 2mm、0mm であった。一方、気温は 12.6°C 、 11.4°C とこの時期の青森ではきわめて高いものであった。2/24 に 8cm から 32cm 深の EC が大きく上昇し、32cm 深で 1dS m^{-1} を超える値を示した。その後、比較的高い値のまま維持されたが、3/13 に 0.88dS m^{-1} から 0.38dS m^{-1} に急激に低下した。高温に伴う融雪水の浸透が肥料成分の深部への移動を促進したと考えられる。また、3 月末から 4 月初旬の融雪期には土壤水分量が増加することで深部の EC が増加した。64cm 深では 3/13~3/25 にかけて 0.12dS m^{-1} から 0.35dS m^{-1} と約 3 倍に増加した。この時期 64cm 深の地温は冷たい融雪水の浸透により、年間を通じてもっとも低かった。測点付近の雪が完全に消えた 4/5 には、全ての深さの EC が秋肥を施用する前と同程度に減少した。

この地域では積雪期間の溶脱を懸念し秋肥に否定的な考え方を示す農家も多い。Fig. 5 を見ると、根雪となった 12/29 頃から本格的な融雪がはじまった 3/13 頃の間では主要な根群域からの極端な溶脱は生じていない。一方、消雪時の 4/5 頃には、EC は施肥前の状態に戻っていた。この数値は、Fig. 4 の無施肥期間の EC に近い値となっており、この時期には肥料成分の大半が吸収、溶脱されたと考えられる。

3.4 春肥後の EC の変化

2011 年は、積雪が継続し根雪となった時期が例年に比べて早く、12 月上旬には園地が全て雪に閉ざされた。そのため、2011 年は施肥が行われず、翌年の 2012/6/2 に春肥 (Case 3) が行われた。肥料および散布量、散布の方法は Case 2 と同様であった。Fig. 6 に 2012/6/2 の春肥後の EC と降水量 (2012/6~2012/11) を示した。

6/2 の施肥直後は、降水がなく EC の変化が認められなかった。6/20 の 9mm の降水時に 8、16cm 深で EC の上昇が見られた。8cm 深では 6/23 に 1.29dS m^{-1} とピークになった後に徐々に低下したが、7/5 の 29mm の降水により再度上昇した。同時に 16cm 深でも 0.38dS m^{-1} から 0.68dS m^{-1} に上昇した。表層土壤に残存していた肥料成分が降水により浸

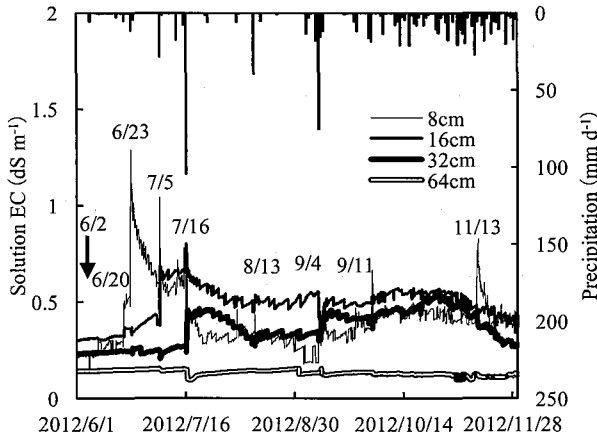


Fig. 6 春肥 (6/2) 後の EC 変化 (2012)

Changes of electrical conductivity after fertilizing on Jun.2.2012

透したと考えられる。また、7/16にあった105mmの非常に強い降水に伴い、8cm深では 0.27dS m^{-1} まで低下した。一方で16, 32cm深では $0.76, 0.46\text{dS m}^{-1}$ とそれぞれこの期間でのピーク値を示した。春肥の後の肥料分の移動は降水量との関連が大きいことが分かる。また、Fig. 5の秋肥の場合と比較し、土壌中のECの値が相対的に小さくなっている。根による養分吸収が活発に行われていると推察される。

その後、8月末まではECは16cm深で約 0.50dS m^{-1} 、32cm深で 0.35dS m^{-1} 前後で大きな変化は見られなかった。8cm深では降水に対応した変動が見られたものの、ECの値は16cm深でもっとも大きく、32cm深、8cm深という順であった。9月に入ると、9/4~9/11で138mmの降水があった。その結果、9/8から9/9にかけECが大きく増減した。8cm深では 0.19dS m^{-1} から 0.40dS m^{-1} に一時的に増加し、その後は 0.30dS m^{-1} 前後の値となった。16cm深では 0.55dS m^{-1} から 0.38dS m^{-1} に減少の後、 0.50dS m^{-1} 前後に回復した。32cm深では 0.34dS m^{-1} から 0.44dS m^{-1} に増加した。8, 16cm深では一旦、大量の降水により肥料成分の溶脱が生じたものの、浅い層位に残存していた成分が浸透することで、このような変化を生じたものと思われる。

9月中旬から11月中旬の収穫期ではECの変化は少なかった。この時期は果実の成熟期にあたり、根の活動がそれほど活発でなかったと思われる。同時に2012年は台風の影響が少なかったことから主要な根群域からの極端な溶脱はなかったと考えられる。ECは32cm深で $0.4\sim 0.5\text{dS m}^{-1}$ の範囲にあり、Fig. 4の無施肥時よりも 0.1dS m^{-1} 程大きかった。一方で、11/13に8cm深で一時的にECが 0.80dS m^{-1} に上昇する現象が見られた。この影響は16cm以深には及んでいない。調査園地は日本海から内陸に10km程の場所にあるが、冬期には 0.6dS m^{-1} の降雪を観測している(加藤ら, 2014)。風向や風速によっては、塩分濃度の高い降水が生じうる可能性に留意する必要がある。その他、8, 9月にも一時的に地表付近のECが上昇する現象が見られた。農作業工程との対比から、葉面散布した薬剤の成分が反応したものと推察される。

3.5 土壌センサデータの蓄積と簡易土壌診断の有用性

施肥の効果について詳細に判定するには、地力窒素の発現や硝酸化作用など土壌液相-固相間の化学的変化がもたらす影響のほか、リンゴの樹体による吸収などといった点についても検討する必要がある。現場で採取した土壌溶液の化学組成と土壌センサで測定した土壌溶液ECの関連性を把握することについては、今後さらに進めていく予定にしている。一方、本研究で示したように長期のモニタリングにより蓄積したデータを相対的に比較することからも、施肥後の土壌中での肥料成分の移動を簡便に「見える化」できる。また、土壌溶液ECは土壌水分量 θ との関連性が大きく、土壌センサ(STE)の活用により θ とECを同時計測する意義はきわめて大きいといえる。

本研究では6年間の園地での連続したモニタリング調査から、調査園地における施肥後のECを中心とした土壌環境変化の「見える化」を図った。具体的には、Fig. 4に示した無施肥期間(2013/6~2014/5)と5回の各施肥後のECの変化を比較することで、それぞれの施肥の土壌への効果を判断できる。また、本文中で示したCase 2(秋肥)とCase 3(春肥)の比較から、調査園地で同一肥料を異なる時期に施肥した場合に起こりうる状況の理解を可能にする。さらに、春肥として、有機系肥料を施肥した(Case 3)場合とアミノ系肥料を施肥した(Case 5)場合のECの変化を比較することで、肥料を変更した場合の土壌への影響の違いを簡便に知ることができる。このような情報は農家にとって、施肥の必要性やそのタイミングを判断するうえで、営農上きわめて有効な情報となる。

これらの情報に、土壌センサの特徴や簡易な校正法(三石・溝口, 2014; 武藤ら, 2015)を組み合わせ、簡便な形で園地の土壌環境の傾向把握を可能にすることで、土壌センサが生産現場における土壌環境判定ツールとして、農家の営農上の意志決定に重要な役割を担うことができる。

4. おわりに

本研究では、青森県北津軽郡鶴田町の一般農家のリンゴ園を対象に施肥の状況とECを中心とした土壌環境について長期にモニタリングした。今回は、土壌センサのデータと農家への聞き取りから、秋肥と春肥後の土壌環境を検討した。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 調査した園地では、積雪期間中、土壌水分量の変動は小さく、秋肥をした場合にも主要な根群域からの極端な溶脱は見られなかった。冬期間の園地では、高温時の融雪水の浸透が肥料成分の動態に大きく影響することが分かった。一方、融雪期には、根による吸収や融雪水による溶脱の影響を受け、消雪時点ではECは施肥前の状態に戻っていた。
- 2) 春肥を行った場合、ECは降水の影響を強く受けた。強い降水により、肥料成分が急激な浸透を示す場合もあるが、雨が少ない場合には地表付近に長期に残存する場合があった。さらに、作業工程や周辺環境の変化がECに影響する可能性があることが分かった。

3) 土壌センサを適切に配置し、データを蓄積することで、園地内の土壌環境の「見える化」が可能となり、施肥後の土壌中における肥料成分の移動を把握することができた。これらの情報は、施肥の実施方法を決めるうえで営農上有用な情報となり、土壌センサが生産現場における土壌環境の把握と施肥に関する意思決定支援にきわめて有効なツールとなることが分かった。

土壌センサを活用し、施肥後の土壌環境変化を把握するには、正確な数値の計測という側面と、実利用に即した形で園地の土壌環境を「見える化」という二つの側面が存在する。本報では後者に重点を置いた考察を進めたが、今後も、農家の生産現場の実態を取り入れたモニタリングを実施し、二つの側面から多雪地帯のリンゴ園地における有効な施肥方法について検討を続ける予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、修了生である佐藤江里子さん、岸 知彦さんより多大な協力を得た。また、本研究の一部は科学研究費補助金（研究課題番号 24658199, 24580344）にもとづいた。

引用文献

- 青森県 (2008) : 健康な土づくり技術マニュアル, p.70, 93-96.
- Decagon Devices, Inc. (2016) (accessed 2016.4.1) : 5TE Water Content, EC and Temperature Sensor, Version: March 11, 2016 — 11:55:57, (online), <http://manuals.decagon.com/Manuals/13509_5TE_Web.pdf>
- Hilhorst, M.A. (2000) : A pore water conductivity sensor, *Soil Science Society of America Journal*, **64**(6), 1922-1925.
- 加藤 幸, 伊藤 哲, 三石正一, 溝口 勝 (2012) : 積雪地帯におけるリンゴ園地の施肥方法とその検証, 2012 年度土壌物理学会大会講演要旨集, 18-19.
- 加藤 幸, 緒方英彦, 溝口 勝 (2014) : Winter Index (冬の厳しさ指数) を利用したリンゴ園の雪害と除排雪の評価, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 528-529.
- 黒田治之, 千葉和彦 (2006) : わい性および半わい性台木を利用したリンゴ ‘スターキング・デリシャス’ 樹の根成長に及ぼす栽植密度の影響, 園芸学会雑誌, **75**(1), 91-99.
- 三石正一, 溝口 勝 (2014) : 静電容量型 ECH₂O 土壌水分センサーのキャリブレーション, 土壌の物理性, **126**, 63-70.
- 溝口 勝 (2012) : フィールドモニタリングシステム, 農業農村工学会誌, **80**(9), p.50.
- 水谷房雄, 平塚 伸, 伴野 潔, 久保田尚浩, 石井孝昭, 若菜 章, 片岡郁雄, 米森敬三, 久保康貴, 山田 寿 (2002) : 最新果樹園芸学, 朝倉書店, 125-132.
- 武藤由子, 渡辺晋生, 山本清仁, 倉島栄一 (2015) : 5TE センサーで測定した土壌水分量の簡易補正と電気伝導率の検証, 農業農村工学会論文集, **296**, I_9-I_17.
- 登尾浩助, 颯田尚哉, 古賀 潔, 馬場秀和, 向井田善朗 (2005) : TDR 法を使った不飽和土壌中における水分・硝酸態窒素含量の測定, 土木学会論文集, **783**/VII-34, 15-21.
- 斉藤 寛, 花田 慧, 青山正和 (1985) : 土壌類型が異なるリンゴ園の有効根群域とその根群密度 第 2 報土壌水分環境, 弘前大学農学部学術報告, **44**, 17-38.
- 坂本 清 (2006) : リンゴ樹に対する肥効調節型肥料等の秋施用の影響, 東北農業研究, **59**, 129-130.
- 佐藤雄夫 (2000) : 春肥と秋肥, “農山漁村文化協会編, 果樹園芸大百科 2 リンゴ”, 農山漁村文化協会, 297-298.
- 杉浦 明 (2004) : 新版 果樹栽培の基礎, 農山漁村文化協会, 52-54.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines, *Water Resources Research*, **16**(3), 574-582.
- 上田仁悦, 松井 巖, 近藤 悟 (1993) : リンゴ ‘つがる’ ‘王林’ ‘ふじ’ M.26 マルバ二重台樹の生育, 収量, 果実品質に及ぼす窒素施肥量と施肥時期の影響, 東北農業研究, **46**, 193-194.

Visualization and Evaluation of the Soil Environment in Apple Orchard after Fertilizing

KATO Koh*, ENDO Akira*, CHIBA Katsumi** and MIZOGUCHI Masaru***

* Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University, 3 Bunkyo-cho, Hirosaki, Aomori, 036-8561, JAPAN

** School of Food, Agriculture and Environmental Sciences, Miyagi University,
2-2-1 Hatadate, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0215, JAPAN

*** Graduate School of Agricultural and Life Science, The University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8685, JAPAN

Abstract

In regions with heavy snowfall like Aomori prefecture, where orchards are covered with snow during the winter, the spring fertilization is often recommended in order to avoid leaching of fertilizer from main root zone under the snow. It is useful to measure the electrical conductivity (EC) and the soil water content using soil sensors to detect the leaching after fertilization. In this study, the authors collaborated with farmers in Tsuruta, Aomori prefecture, to monitor the soil environment (soil water content, EC of soil solution and soil temperature) after fertilizing in apple orchards using the Field Monitoring System (FMS).

As a result of 6 years monitoring, we found that 1) Severe leaching was not observed in the investigated orchard during the period of lingering snows. It was found that seepage of melting snow, at higher temperature, has a significant effect on the dynamic state of fertilizer. After the period of snow melting, EC attenuated to the level before fertilization. 2) Penetration of fertilizer in spring was strongly affected by precipitation. Heavy rains may cause severe leaching of fertilizer components, and light rains make fertilizer remain close to the surface. 3) We visualized the penetration of fertilizer by installed soil sensors in the orchard and helped farmers' decision-making for fertilization timing.

Key words : *Apple orchards, Fertilization, Monitoring, Electrical conductivity of soil solution, Soil sensor*