

厚さの異なる時間領域反射法（TDR）霜センサの霜 検知感度

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学農学部 公開日: 2020-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 澁谷, 和樹, 宮川, 麗, 西脇, 淳子, 小松崎, 将一, 登尾, 浩助 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20985

〔研究論文〕

厚さの異なる時間領域反射法 (TDR) 霜センサの霜検知感度

澁谷 和樹¹・宮川 麗²・西脇 淳子³・小松崎将一⁴・登尾 浩助^{2*}

(2019年6月27日受理)

Frost detection sensitivity of time domain reflectometry (TDR) frost sensors with different thicknesses

Kazuki SHIBUYA¹, Rei MIYAKAWA², Junko NISHIWAKI³,
Masakazu KOMATSUZAKI⁴, and Kosuke NOBORIO²

Abstract

Frost damage to agricultural products in Japan is by no means uncommon. Moreover, since there is no sensor capable of detecting a minute amount of frost with high accuracy, the presence of frost can be determined only by visual observation, making the study of frost damage in the field challenging. Therefore, the actual conditions of frost damage has not been adequately elucidated. Unlike the vibration sensor, the frost sensor based on time domain reflectometry (TDR) has no malfunction-causing factors, and it can distinguish dew condensation and frost more clearly than the temperature-sensitive resistance element. However, improvement in the detection sensitivity of the TDR frost sensor is desired. We have developed a frost sensor with an accelerated cooling rate and reduced heat capacity by reducing the thickness of the TDR frost sensor. In this study, the detection sensitivities of TDR frost sensors of 1.6 and 0.075 mm thicknesses were compared under the conditions of dew condensation, frozen dew, and hoar frost generation. The flexible printed circuits (FPC) frost sensor that had a small thickness and thus a small heat capacity responded promptly to the environmental changes, such as radiation cooling, and the times of condensation, frozen dew, and hoar frost generation could be detected without delay. The amount of frost on the sensor also increased. Using the FPC frost sensor, dew condensation, frozen dew, and hoar frost could be detected in the field where meteorological conditions were constantly changing. Various frost formations could be detected with high accuracy by combining this FPC frost sensor that can promptly detect environmental changes with a duty-cycle TDR device (manufactured by Kett Electric Laboratory) that can measure minute changes in the dielectric constant.

¹ 明治大学大学院農学研究科

² 明治大学農学部

〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

³ 茨城大学農学部

〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1

⁴ 茨城大学農学部附属国際フィールド農学センター

〒300-0331 茨城県稲敷郡阿見町阿見4668-1

* 電子メールアドレス noboriok@meiji.ac.jp

電話 044-934-7156

要約 日本における農作物の霜害被害は決して軽微ではない。しかし、微量な霜を高精度で検知可能なセンサが存在しないため、霜の観測が目視でしか出来ないことが野外での霜害の研究を困難としている。そのため、農作物への霜害の実態解明に至っていない。Time domain reflectometry (TDR, 時間領域反射) 法を用いた TDR 霜センサは、振動式のように誤作動を起こす要因がなく、感温抵抗素子と異なり結露と霜を明確に判別することができる。しかし、空気の比誘電率と霜の比誘電率に大きな差がないため、着霜の始まりのような微量な霜の検知が困難な場合があり、検知感度のさらなる向上が望まれている。そこで、TDR 霜センサの検知部の厚さを薄くし熱容量を小さくすることで冷却速度を速め、霜が検知部上で発生しやすくすることで気象条件が刻々と変化する場合においても、より即刻に検知が可能なセンサを開発できると考えた。本研究では、厚さが 1.6 mm (RPB タイプ) と 0.075 mm (FPC タイプ) の TDR 霜センサの検知感度を結露、結露が凍結した水霜、水蒸気が昇華した白霜が発生した場合において比較した。その結果、薄く熱容量が小さい FPC タイプの霜センサの方が放射冷却などの気象の変化に霜センサ温度が即応するので、結露・水霜・白霜の生成時間に遅れがなく検知でき、霜センサ上での結露や霜の発生量も多くなった。FPC タイプの霜センサを用いることで、気象条件が刻々と変化する野外での結露・水霜・白霜を検知できることが示され、比誘電率の微量な変化を測定できるデューティ比型 TDR 装置 (ケット科学研究所製) との組み合わせによって、精度良く検知できることがわかった。

キーワード : 水霜, 白霜, 結露, 比誘電率

1. 緒言

夜間の放射冷却によって、著しく低い気温に曝されることで、農作物が凍結し枯死、もしくは一部が損傷を受けることを霜害という。多くの場合、過冷却された植物の表面に霜が付着することで、細胞間隙と細胞内の水の凍結が誘引され、霜害が発生する (酒井 1963)。早春、農作物が十分に生長し始める前の芽や花が被害を受ける晩霜害と、夏作物を秋深くまで栽培を続け、突発的な気温の低下により被害を受ける初霜害がある。また、温暖化によって、暖冬による耐凍性の向上不足や発芽期・開花期の前進化が起こり、果樹では霜害の増加が指摘されている (杉浦ら 2009)。2013年の被害面積は 15,400 ha, 被害見込金額は75億円に上り (農林水産省 2013), 面積当たりの被害額としては同年の鳥獣害被害と比べても倍以上大きく、日本における農作物の霜害被害は決して軽微ではない。しかし、微量な霜を高精度で検知可能なセンサがなく、霜の観測が目視でしか出来ないことが、野外での霜害の研究を困難としており、被害軽減の解決につながる霜害の実態解明に未だ至っていない。従来、結露及び降霜を検知する手段として、振動式や光学式の検知装置が知られている。振動式は、振動子の表面の

結露、または降霜による振動子の共振周波数の変化や振幅の変化で結露と降霜を判定する。光学式は、発光素子、受光素子、反射面を有し、受光素子に入射する光量の変化で反射面の表面の結露と降霜を判定する。しかし、振動式は、振動子上への物質の付着あるいは内外部から加えられる振動の影響で容易に誤作動をするという短所がある。また光学式も、小型化が困難で製造コストも高いという短所がある。これに対し、その他にも安価で検知精度の優れた降霜の検知装置として、感温抵抗素子の温度変化で結露と降霜を判定する装置が開発されている。しかし、この装置は、感温抵抗素子の温度のみで結露または降霜を判定しているため、結露と降霜とを明確に区別することが困難である (登尾 2008)。このように、それぞれの検知装置に一長一短がある。そして、これらの降霜検知装置が研究や農業現場で使用された例はほとんどなく、安価で結露と霜を明確に判別可能な高精度な霜検知センサが必要とされている。加藤ら (2019) は、電磁波の伝播速度から比誘電率を経時的に測定することができる TDR (Time Domain Reflectometry, 時間領域反射) 法を用いることで、光学式に比べ安価に製作が可能であり、振動式のように誤作動を起こす要因がなく、感温抵抗素子と異なり結露と霜を明確に判別することが

可能であることを明らかにした。TDR 霜センサは、空気の比誘電率 (1) が水の比誘電率 (80) と氷の比誘電率 (3.5) と異なる点に着目したセンサであり、検知部に付着した物質の特定ができる。結露の発生時には空気と水が検知部上で混在するため空気より比誘電率が大きく上昇する。霜には結露が凍結して成る水霜、水蒸気が昇華して成る白霜があるが、これらの霜の発生時には空気と氷が検知部上で混在するため、結露の発生時ほどではないが空気より比誘電率が上昇する。このように、比誘電率の変化から検知部に発生した結露、水霜、白霜を明確に区別することが可能である。しかし、白霜の発生前 (空気) と発生中 (霜) の比誘電率の変化は、約0.042から約0.14と非常に小さいため、着霜の始まりのような微量な霜の有無を判別することが難しい場合があり、検知感度のさらなる向上が課題であった。比誘電率は、物質によっても変化するが発生量でも変化するため、検知部上に霜が少しでも多く発生しやすくすることで、より着霜の始まりを検知しやすくなると考えられる。

そこで、検知部を薄くし熱容量を小さくすることで冷却速度を上げ、検知部上で霜が発生しやすくすることで検知感度を向上させ、気象条件が刻々と変化する場合においても、より即刻に検知が可能なセンサを開発できるのではないかと考えた。本研究では、検知部の厚さの違いによる TDR 霜センサの検知感度を結露、水霜、白霜が発生した場合において、それぞれ比較したので報告する。

2. 材料と方法

TDR 霜センサは、加藤ら (2019) の先行研究で用いられたガラスコンポジット製感光基板 (サンハヤト社製) をプリント基板とした Rigid Printed Board (RPB: 厚さ 1.6 mm) (Fig. 1a) と (株) ケット科学研究所に製作依頼したポリイミドフィルム (Du Pont 社製) をベースとした Flexible Printed Circuits (FPC: 厚さ 0.075 mm) (Fig. 1b) の 2 種類を用いた。ガラスコンポジットとポリイミドフィルムは電子回路のプリント基板として一般的によく用いられる絶縁体である。この 2 つの霜センサは、導体長さ 57

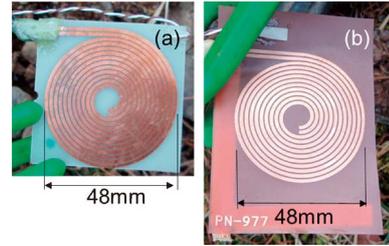


Fig. 1. (a) RPB frost sensor (thickness 1.6 mm), and (b) FPC frost sensor (thickness 0.075 mm).

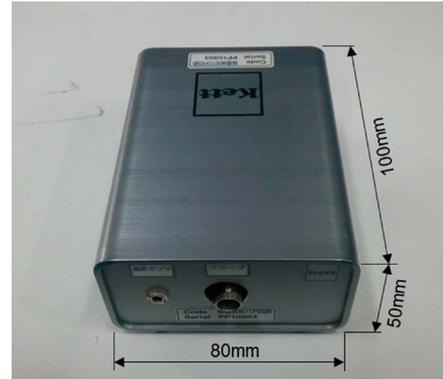


Fig. 2. Custom-made duty-cycle TDR device made by Kett Electric Laboratory.

cm, 導体幅 0.1 cm, 導体間隔 0.05 cm で同一であるが、RPB タイプ霜センサの厚さは 1.6 mm, 一方、FPC タイプ霜センサの厚さは 0.075 mm であった。RPB タイプ霜センサの厚さは FPC タイプ霜センサの約 21 倍にあたる。比誘電率の測定には、RPB タイプ霜センサは TDR100 (Campbell Scientific 社製)、FPC タイプ霜センサは特注のデューティ比型 TDR 装置 (ケット科学研究所製) を用いた (Fig. 2)。

実験は、茨城大学農学部附属国際フィールド農学センターの採草地において、2016年1月27日から4月28日まで行った。各霜センサは、地上 5 cm の高さに検知部を上面にして水平に設置し、データロガー (Campbell Scientific 社製, CR1000) を用いて、比誘電率とセンサ温度 (T 型熱電対: 感部長さ 0.7 mm) を 1 分間隔で測定・記録した。微気象環境の測定として、風向風速 (Met One Instruments 社製, 034B) は、高さ 1.5 m に設置し、気温と相対湿度は高さ 1.2 m の通風筒内に温湿度計 (Vaisala 社製, HMP45C) を設置し、データロガー (Campbell Scientific 社製, CR3000) を用いて 1 分間隔で記録した。また、気温

と相対湿度より露点温度を算出した。

3. 結果

3.1 結露の検知

薄いFPCタイプの霜センサと厚いRPBタイプの霜センサを用いた結露の観測結果(2016年1月31日12:00から2月1日12:00)をFig. 3に示した。空気の比誘電率(dielectric constant)が1に対して、水の比誘電率は80であるため、RPBタイプは17:40頃、FPCタイプは18:10頃、検知部に結露が発生することで比誘電率は上昇し始め、RPBタイプは23:40頃まで、FPCタイプは3:15頃までにかけて、検知部上の結露量が増加するにつれて比誘電率が徐々に上昇したと考えられる。その後、水の比誘電率が80に対して、空気の比誘電率は1であるため、結露が蒸発し始めることで比誘電率は、大きく減少したと考えられる。両方の霜センサで測定した比誘電率の上昇開始時刻を比較すると結露の開始時刻に30分の差が生じた(Fig. 3a)。FPCタイプは薄く熱容量が小さいため、放射冷却によってセンサ温度が低下し、18:00頃から20:30頃にかけて露点に近づくのがRPBタ

イプよりわずかであるが早く、その分、結露が早く生じたと考えられる。また、1:00頃から3:15頃にかけてFPCタイプのセンサ温度はRPBタイプより最大で約0.9°C低くなることでより露点に近づき、それにともない比誘電率が上昇した。空気の比誘電率が1に対して水の比誘電率は80であるため、この比誘電率の上昇が大きい分だけ、FPCタイプの検知部上で発生した結露量が増加したと考えられる。3:15頃から結露の蒸発が始まりと考えられる比誘電率の減少が見られた。この時刻は両タイプの霜センサともほぼ同じであったが、蒸発が終わる時刻は結露量にも依存すると考えられ、結露量が多くなりやすいFPCタイプの方が1時間ほど遅く蒸発が終わったと考えられる(Fig. 3a)。結露量が多い場合であれば、厚いRPBタイプでも結露の発生を検出する時刻が若干遅れるが検知することが出来た。しかし、微量な結露や急激な気象の変化で生じた結露は検知出来ない場合が多かった。例えば、Fig. 4の観測結果(2016年2月9日12:00から2月10日12:00)のように風速が大きい夜において、22:00頃から23:00頃にかけて1時間ほどだけ風速が小さくなることで放射冷却が強まり、霜セ

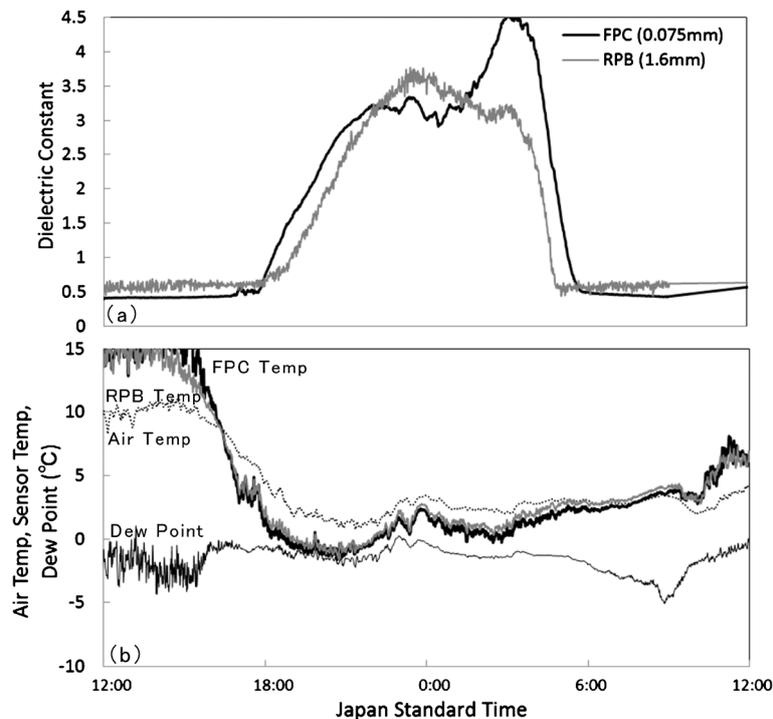


Fig. 3. Detection of dew condensation by FPC type and RPB frost sensors: (a) dielectric constant, and (b) air, sensor, dew point temperatures. The data were measured at between 12:00 on Jan. 31, 2016, and 12:00 on Feb. 1, 2016.

ンサ温度が急激に低下した日があった。薄い FPC タイプは、風速が小さくなると霜センサ温度は急激に低下して露点に近づき、結露を検知した (Fig. 4a)。一方、厚い RPB タイプでは、風速が小さくなると霜センサ温度は低下したが、露点付近までは低下しなかったため結露を検知しなかった (Fig. 4b)。

3.2 水霜の検知

薄い FPC タイプの水霜センサと厚い RPB タイプの水霜センサを用いた霜の観測結果 (2016年2月4日 12:00から2月5日12:00) を Fig. 5 に示した。空気の比誘電率が1に対して、水の比誘電率は80であるため、FPC タイプは18:00頃、RPB タイプは19:30頃に、検知部に結露が発生することで比誘電率は上昇し始めたと考えられる。水の比誘電率が80に対して、氷の比誘電率は3.5であるため、FPC タイプは22:30頃、RPB タイプは23:40頃に、結露が凍結して水霜が発生することで比誘電率は急激に低下したと

考えられる。その後、検知部上で水霜の量が増加することで比誘電率が徐々に上昇したと考えられる。そして、氷の比誘電率が3.5に対して、水の比誘電率は80であるため、FPC タイプは7:15頃、RPB タイプは8:20頃に、検知部上の水霜が融解すると比誘電率は急激に上昇したと考えられる。熱容量が小さい FPC タイプは、放射冷却によって霜センサ温度が低下したため、わずかであるが RPB タイプより早く霜センサ温度が低下した (Fig. 5b)。そのため、FPC タイプの方が結露が1時間30分程度早く生じ、結露の凍結 (水霜) を1時間10分程度早く検知した (Fig. 5a)。また、RPB タイプより早く冷えるため、FPC タイプの方が結露量は多く、それに伴い水霜量も多かった。水霜の融解が始まるタイミングも FPC タイプが1時間程度早かった。これは、日の出後の太陽放射による加熱や気温の上昇に伴い、熱容量の小さい FPC タイプの方が霜センサ温度が早く昇温したためと考えられた (Fig. 5b)。

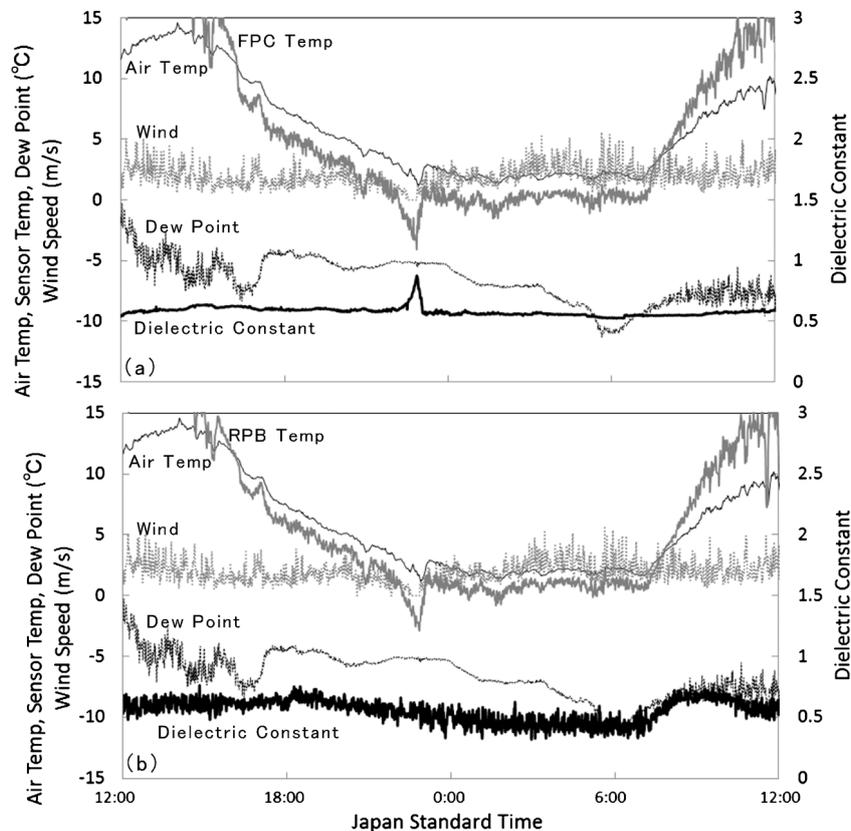


Fig. 4. Detection of dew by (a) FPC and (b) RPB frost sensors when high windspeed was interrupted for a while. The data were measured at between 12:00 on Feb. 9, 2016, and 12:00 on Feb. 10 2016.

多くの場合、Fig. 5ようにFPCタイプの方が結露の凍結が15分から1時間程度早く起こるが、Fig. 6の観測結果（2016年2月18日12:00から2月19日12:00）のように結露量が極めて多い場合には結露が凍結するまでに時間がかかり、FPCタイプであっても水霜に成るまでにRPBタイプと比べて2時間程度遅くなるケースがあることを確認した。

3.3 白霜の検知

薄いFPCタイプの霜センサと厚いRPBタイプの霜センサを用いた白霜の観測結果（2016年2月10日12:00から2月11日12:00）をFig. 7に示した。空気の比誘電率が1に対して、氷の比誘電率は3.5であるため、FPCタイプは21:00頃、RPBタイプは22:30頃に、検知部に白霜が発生することで比誘電率はわずかに上昇し始めたと考えられる。その後、検知部上で白霜の量が増加することで比誘電率が徐々に上昇したと考えられる。そして、氷の比誘電率が3.5に対して、水の比誘電率は80であるため、FPCタイプは7:20頃、RPBタイプは8:10頃に、検知部上の水霜

が日の出に伴い融解することで比誘電率は上昇したと考えられる。FPCタイプは薄いので熱容量が小さく、放射冷却によって霜センサ温度が低下するため、わずかであるがFPCタイプがより早く霜センサ温度が低下した（Fig. 7b）。そのため、結露や水霜と同様にFPCタイプの方が1時間30分程度早く着霜が生じた（Fig. 7a）。FPCタイプとRPBタイプでは霜センサ温度の差はわずかであったが、より早く冷えるFPCタイプの方が霜量は多かったと考えられた。そのため、着霜の始まりである霜の発生前（空気）と発生中（白霜）の比誘電率の変化は、FPCタイプが約0.57から約0.89と差は0.32であったが、RPBタイプは約0.62から約0.44と差は0.18であり、FPCタイプの方が比誘電率の変化が大きく、着霜の始まりを検知しやすい結果となった。水霜と同様に白霜の融解が始まるタイミングもFPCタイプが50分程度早かった。これは、日の出後の太陽放射による加熱や気温の上昇に伴い、熱容量の小さいFPCタイプの方がセンサ温度が早く上昇したためと考えられた（Fig. 7b）。

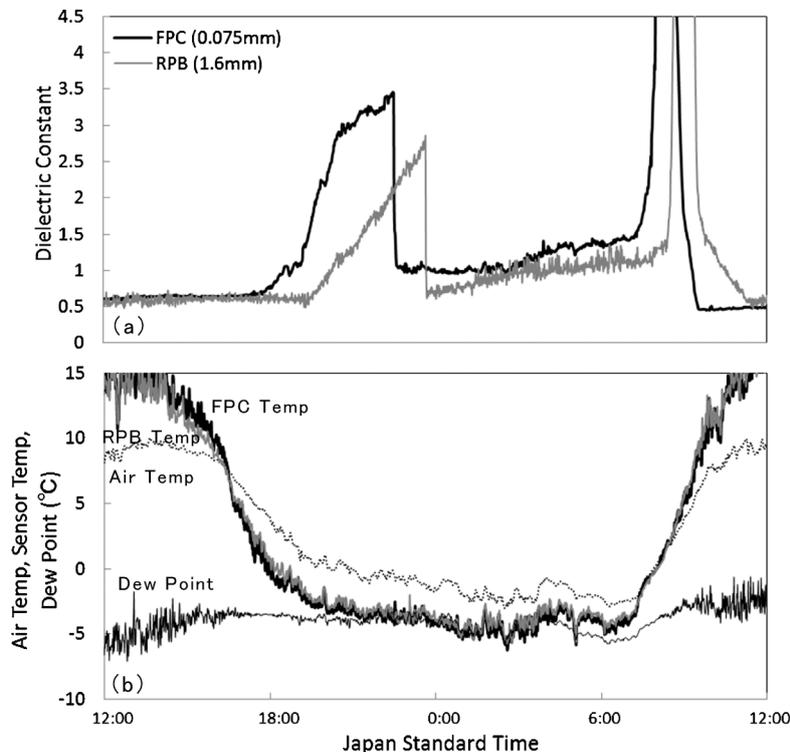


Fig. 5. Detection of frozen dew by FPC type and RPB frost sensors: (a) dielectric constant, and (b) air, sensor, dew point temperatures. The data were measured at between 12:00 on Feb. 4, 2016, and 12:00 on Feb. 5, 2016.

TDR 霜センサの霜検知感度

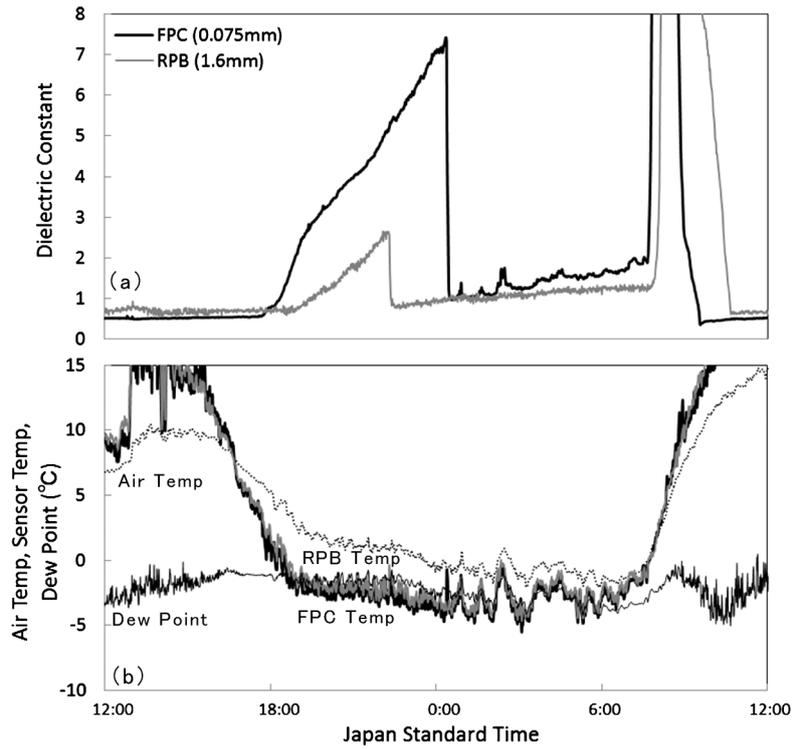


Fig. 6. Detection of frozen dew by FPC and RPB frost sensors: (a) dielectric constant, and (b) air, sensor, dew point temperatures when the amount of dew was large. The data were measured at between 12 : 00 on Feb. 18, 2016, and 12 : 00 on Feb. 19, 2016.

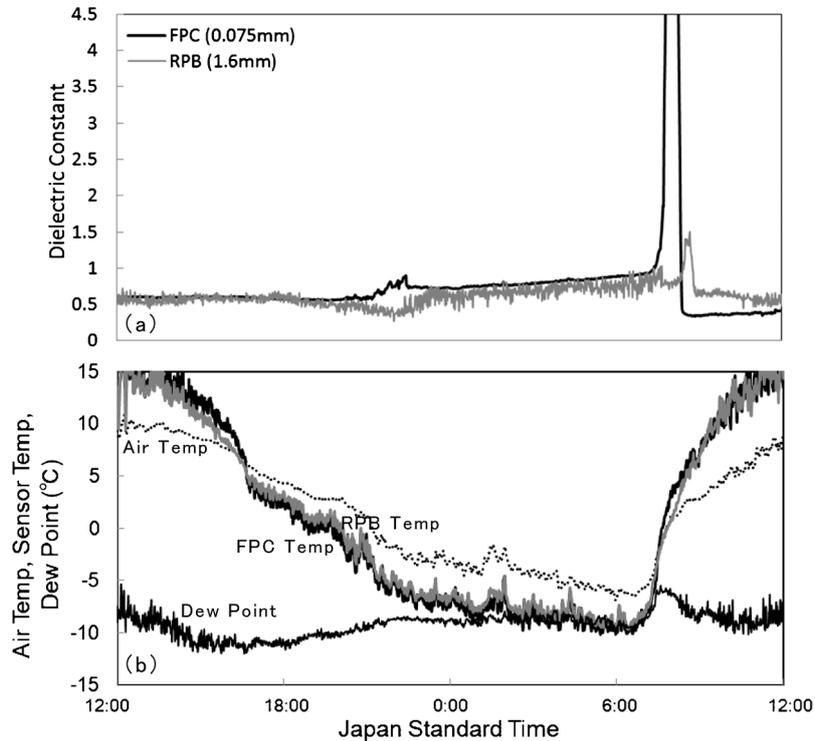


Fig. 7. Detection of hoar frost by FPC and RPB frost sensors: (a) dielectric constant, and (b) air, sensor, dew point temperatures. The data were measured at between 12 : 00 on Feb. 10, 2016, and 12 : 00 on Feb. 11, 2016.

4. 考察

FPC タイプ (厚さ 0.075 mm) と RPB タイプ (厚さ 1.6 mm) を比較すると、FPC タイプの方が薄く熱容量が小さいため放射冷却によって霜センサの温度が低下しやすいため、霜センサ上で結露・水霜・白霜の発生する時間が早く、発生量も多くなった。

加藤ら (2019) が測定した白霜の発生前 (空気) と発生中 (霜) の比誘電率の変化は、約0.042から約0.14で差は0.098と非常に小さかったが、本実験ではFPC タイプが約0.57から約0.89と差は0.32であり、RPB タイプは約0.62から約0.44と差は0.18であった。白霜は空気から氷という比誘電率の変化が小さい現象であるため、着霜の始まりのような微量な霜の有無を判別することが難しい場合があったが、FPC タイプの方が白霜の発生量が多くなったことで比誘電率の変化が大きく、着霜の始まりをより検知しやすくなったと考えられた。RPB タイプと比べてFPC タイプでは、結露量が多いために結露の蒸発に時間がかかったケース、日の出後の太陽放射による加熱や気温の上昇に伴うセンサ温度の昇温が早いいため霜の融解も早いケース、結露量が多いために結露が凍結するまでに時間がかかり水霜の発生が遅れるケースが見られた。薄いFPC タイプと厚いRPB タイプでは、検知部上での現象に大きな差があり、FPC タイプの方が薄く熱容量が小さいため、放射冷却などの気象条件が刻々と変化する野外において結露・水霜・白霜をより即刻に検知できることが示された。FPC タイプとRPB タイプは共に1分間隔での測定にも関わらず、RPB タイプの方が測定値の変動が大きかった。そのため、RPB タイプでは特に白霜が発生する際の比誘電率の微量な変化が捉えにくかった。一方、FPC タイプでは、測定値に変動がほとんど生じなかったため、明確に着

霜のタイミングを検知することができた。これは比誘電率の測定に、RPB タイプはTDR100 (Campbell Scientific 社製) を、FPC タイプは特注のデュエティ比型TDR測定装置 (ケット科学研究所製) を使用したことにより、測定装置の測定分解能もしくは波形解析ソフトの分解能に起因すると考えられた。

5. まとめ

FPC タイプを使うことにより、気象条件が刻々と変化する野外での結露・水霜・白霜を検知できることが示された。振動式や感温抵抗素子を用いたセンサなど、検知部に霜を付着させることで霜の有無を検知するセンサはいくつかあるが、熱容量といった検知への霜の発生しやすさを考慮した設計でないと、観測したい対象物への霜発生の測定精度が十分に得られないと考えられる。また、結露とそれに続く水霜は比誘電率が大きく変化するため測定しやすいが、白霜の場合、着霜による比誘電率の変化が小さいので測定が困難である。そのため、白霜の検知にはより気象の変化に即応した検知が可能であるFPC タイプ霜センサと比誘電率の微小な変化を正確に捉えることが可能なデュエティ比型TDR測定装置 (ケット科学研究所製) の組み合わせが必要であることが示された。

引用文献

- 加藤高寛・澁谷和樹・宮川麗・登尾浩助 (2019) : 時間領域反射法を利用した霜検知センサーの開発. 明治大学農学部研究報告, 68: 1-7.
- 酒井昭 (1963) : 異常寒波と植物の凍害. 雪氷, 25: 78-80.
- 杉浦俊彦・杉浦裕義・阪本大輔・朝倉利員 (2009) : 温暖化が果樹生産に及ぼす影響と適応技術. 地球環境, 14: 207-214.
- 農林水産省 (2013) : 平成25年農作物災害種類別被害統計 (被害応急調査結果), 主要災害種類別被害概況 : 3, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/higai/index.html>, (アクセス日 : 2019年9月25日)
- 登尾浩助 (2008) : 降霜検知装置. 特開2009-186387, 特願2008-28366.