

# ひずみセンサを用いたカンキツの水ストレス評価 及び無線式水ストレス評価装置の開発

仙波浩雅 石本 守\*<sup>1</sup> 菊地毅洋\*<sup>2</sup>

Evaluation of water stress for citrus plants using strain gauge sensors  
and development of wireless equipment for water stress evaluation

SENBA Hiromasa, ISHIMOTO Mamoru, and KIKUCHI Takehiro

植物の茎周囲長変化計測センサによりカンキツの水ストレスを評価する方法について検討した。本研究では、農林水産研究所果樹研究センターみかん研究所のほ場（ハウス）で栽培されているカンキツを対象とした。甘平を対象とした実験では、“センサ出力校正値”とちぎった葉により測定した“水ポテンシャル”との間に高い相関関係があることが確認された。さらに、本センサシステムを無線式とするために、ひずみ計測においてアクティブダミー法を用い、2線式センサ回路を導入することで簡素な無線式水ストレス評価センサシステムを試作した。有線式のデータと比較し本システムの有用性を確認した。

キーワード：カンキツ、茎、ひずみセンサ、水ポテンシャル

## はじめに

筆者らが開発した短冊状ゴムシートとひずみゲージを用いた植物の茎周囲長変化計測センサ<sup>1)~3)</sup>（以後、「水分センサ」と呼ぶ）は、トマトのように茎が比較的柔らかい野菜の水ストレスの程度を評価し、適切なかん水タイミングを実施するために導入した新しいタイプのセンサである。本センサは、センサ感度に優れているため、カンキツのような茎が硬い植物に対する適用が望まれている。

そこで、本研究では、農林水産研究所果樹研究センターみかん研究所のほ場（ハウス）で栽培されているカンキツを対象として本センサの適用性について検討した。また、本センサはひずみゲージで構成されているため、計測装置（データロガー）に繋ぐためにリード線が必要となる。ハウス内の多数の果樹を評価ターゲットとすると、多数のセンサが必要になるためリード線が長くなる不都合が生じる。そのため、ひずみゲージのリード線が最小長さで済むひずみアンプ付の“無線式データロガー”を試作し、その性能を測定評価した。

## 実験方法

### 1. 有線式データロガーによるカンキツの水ストレス評価

#### (1)水分センサ

本研究に利用した「水分センサ」は、短冊状ゴムシートにひずみゲージ(株共和電業)を接着した簡易なひずみ計測センサである(特許第 5717026 号)。本センサは、幅 8mm のネオプレンゴム（厚み 1 mm、硬度 65(JIS K 6253)、タイガースポリマー(株)）にベースの大きさが幅 3.5mm×長さ 8.5mm の箔超大ひずみゲージ（KFEM、株共和電業）を専用の接着剤で接着した伸縮自在なセンサである。本センサは、一定のテンション（引張の状態を保持）を掛けて茎に取付けるため、センサゴムの長さは茎の周囲長に応じて適切な長さに切断した。なお、センサは、茎取り付け前にひずみゲージの出力値が約 10,000 $\mu\epsilon$  加算されるようにゴムを引っ張り、その状態を約 1 分間保持した。除荷後の無負荷状態のひずみ出力値を A[ $\mu\epsilon$ ]とした。

#### (2)供試カンキツ及び評価方法

\*1(現)松山発電工水管理事務所 \*2 愛媛県農林水産研究所  
この研究は、「平成 24-26 年度戦略的試験研究事業(かんきつニューフェイス安定供給技術開発)」の予算で実施した。  
愛媛県産業技術研究所業績第1号

みかん研究所内のハウスほ場で栽培の‘甘平’(ウンシュウミカン中間台、13年生)を4樹供試した。それぞれの主枝3本に、2013年9月9日に、地上高約1mで側枝等がなくほぼ円柱形状の部位(直径3.2~3.8cm)を選び、同センサのゴムシートを一定のテンション(A+約

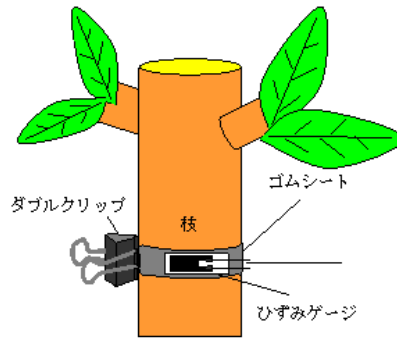


図1 センサの茎への取り付け

4,000 $\mu\epsilon$ )を保持するように巻付け、ダブルクリップで

取付けた(図1)。「水分センサ」からの出力値は有線式のデータロガー(DC3100/203A、日本アビオニクス株)で2014年1月11日まで5分おきに記録した。信号値は気温や湿度等変化の影響を受けるため、同位置に、透明ガラス管に「水分センサ」を取付けブランクとし、この変化の値を減じて補正した。さらにこの補正データは、過去の測定最大値をゼロ[ $\mu\epsilon$ ]としその値との差をとって標準化した。葉の水ポテンシャル(LWP)は、夜明け前及び日中に定期的に1主枝あたり1回1枚ずつ無着果枝の旧葉を除く中位葉を切り取り、「PC法」(DAIKI社DIK-7000使用)により測定し、「水分センサ」信号値との相関を求めた。なお、かん水は表1の日程で実施した。

表1 甘平へのかん水

年月日	かん水時間
2013/8/20	16:50~18:10
2013/9/18	13:50~14:20
2013/9/24	11:40~12:50
2013/10/4	15:40~16:10
2013/11/19	15:25~15:35
2013/11/21	12:55~13:00
2014/12/14	5:10~5:40
2014/1/16	17:15~17:45

## 2. 無線式データ収集装置

### (1) 無線式ひずみ計測システムの構成

試作した無線式ひずみ計測システムは、①ひずみアンプ(ブリッジヘッド含)、②無線式データロガーから構成される。ひずみ用のアンプは、 $\pm 22,000\mu\epsilon$ のひずみ計測が可能なひずみゲージアンプ(TAK-01、1chタイプ、株東京計器研究所)を使用し、これに専用のブリッジヘッド(SB-01TAK、株東京計器研究所)を接続し、2ゲージ法による結線を行った。これにより2ゲージ法によるひずみ測定が可能となった。ひずみ出力はアナログ電圧信号に変換される。これを無線式データロガーであるワイヤレスデータロガー(RTR-505-VL、電圧測定モジュール、株ティアンドデイ)に接続した(図2)。RTR-505-VLはデータ蓄積を行う子機であり、親機(RTR-500DC)に子機のデータを無線で収集することができる。なお、ひずみゲージアンプは006P積層電池(9V)で駆動可能であるが、連続使用すると半日以下しか使用できないため、無線式データロガーのプリヒーティング機能を活用し、ひずみ測定時の約15秒前と測定時のみ電源利用となるように配線・設定した。

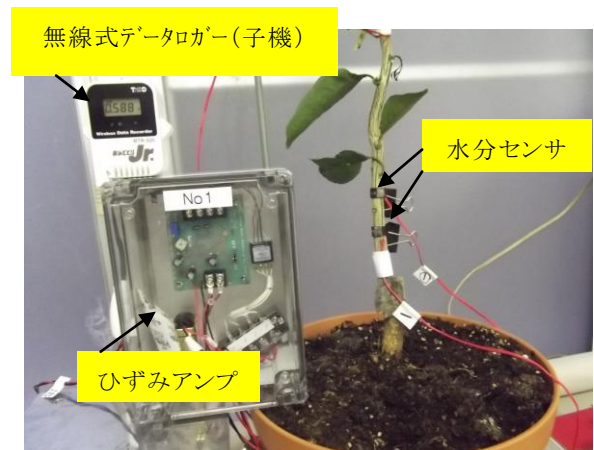


図2 “はるみ”及び無線式データロガー

### (2) 有線式データロガーとの信号の比較検証実験

試作した無線式データロガーの性能比較のため、カンキツ苗を用意しこれに水分センサを設置した上で有線式データロガーとの比較を行った。有線式データロガーとしては、前述のDC3100/203A(10ch仕様、日本アビオニクス株)を用いた。測定方法は以下の通りである。直径250mm高さ230mmの栽培ポットに植えたウンシュウミカン苗(品種名:はるみ、高さ60cm)に、土面から約10cm上の位置で茎(径9.0mm)に約4000 $\mu\epsilon$ の初期テンションで2つの水分センサが鉛直方向に並ぶように巻き付け、それぞれを市販のダブルクリップで留めた(図2)。一方のセンサを無線式データロガーへ、他方を有線式データロガーにそれぞれ接続した。データの測定は、10分毎とし、2014年3月17日16時~2014年5月9日午前9時までの間、比較測定した。それぞれのデータは前項と同様に、過去の測定最大値をゼロ[ $\mu\epsilon$ ]としその値との差をとって標準化した。なお、かん水は適時実施した。

## 結果と考察

### 1. 甘平の茎ひずみ信号と水分ストレスの関係

#### (1) 甘平の水分センサの推移

約4か月間に亘って計測した甘平の茎（3樹）に設置した水分センサ（計3つのセンサ）の推移を図3に示す。計測は5分毎に実施したが、データを間引き1時間毎のデータとしてグラフにした。それぞれの茎に設置したセンサの挙動を比較すると10月のデータにややばらつきはあるがそれ以外では5つのセンサはおおよそ同様の挙動をとっているものと言える。それぞれのデータは、1日単位で大きく上下運動を繰り返した。この動きは光合成と大きく関係している。日中、光合成が活発になると茎内の水分は積極的に葉に運ばれて茎は萎むためセンサ出力値が低下する。光合成が弱まると葉への水分運搬は減り茎が膨張することでセンサ出力値は増加する。概して、日の出前にセンサ出力値は最大値となり、午後2時～午後4時くらいに最小値をとることが確認できた。さて、これらの信号の挙動を見ると、センサ出力の最小値（下向きのピーク）は10月頃に最も低くなり、11月～1月にかけて全体が徐々に低下するのが分かる。10月は比較的天候が安定しており、かん水量も他の月と比べて少なかったため、水が切れ乾燥が促進したことが第一の原因と考えられる。

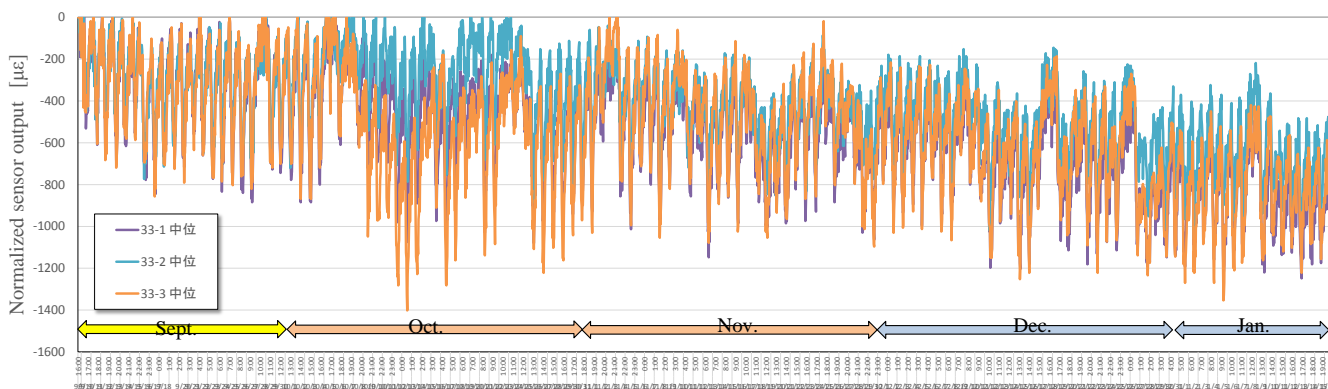


図3 “甘平”に設置した水分センサ出力の推移(2013.9.9～2014.1.16)

#### (2) 水ポテンシャルとの関係

ちぎった葉から測定した水ポテンシャルと、水ポテンシャル測定時刻における水分センサ出力値の3樹分の推移を図4に示す。葉の水ポテンシャルと水分センサの値は対応する樹木のみ

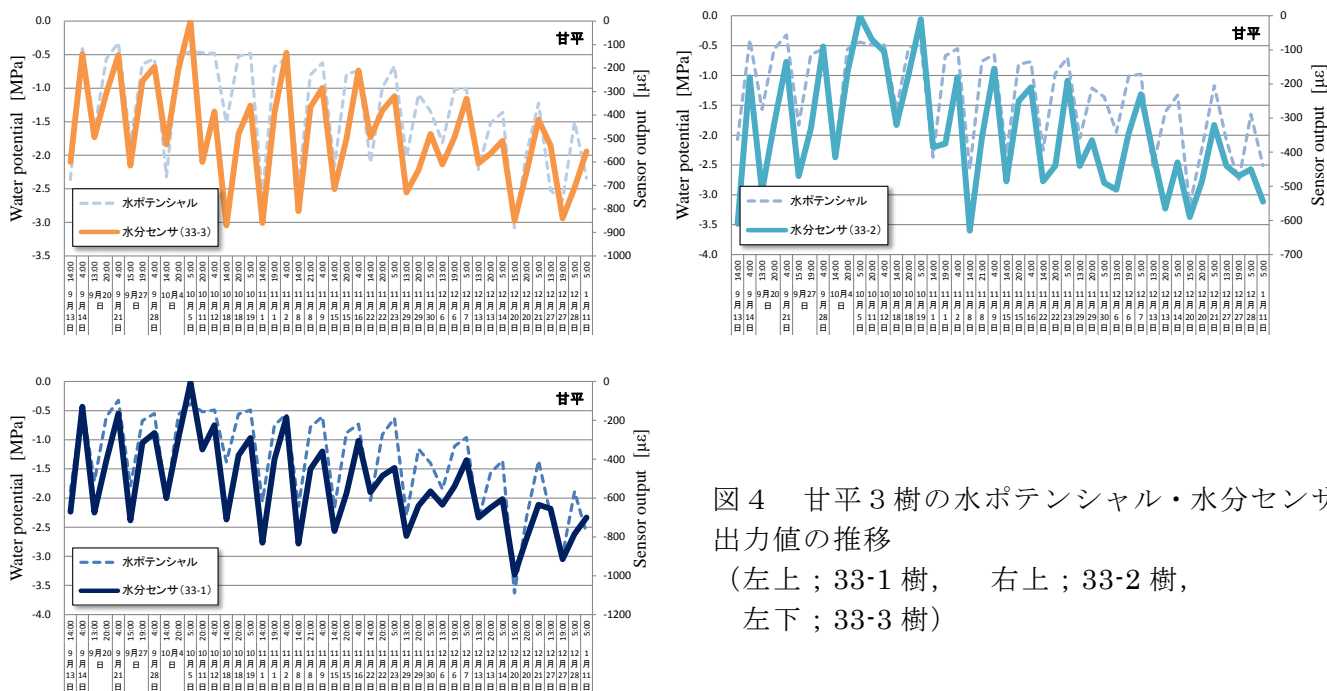


図4 甘平3樹の水ポテンシャル・水分センサ出力値の推移  
(左上；33-1樹， 右上；33-2樹，  
左下；33-3樹)

葉あるいは茎で測定された値であるためそれぞれ異なることに注意されたい。それぞれの樹木についても水分センサ出力値の挙動と水ポテンシャルの挙動はほぼ一致していると言える。従って日夜を問わず水分センサ出力値を監視することでその樹木の水ポテンシャルの推移がおおよそ推測することが可能であると言える。次に、水分センサの出力値と水ポテンシャルの関係を図5に示す。図5では、樹木別の水分センサ出力値と水ポテンシャルの間の関係を示した。すべての樹木に対して両者間を2次曲線近似した。相関関数の決定係数  $R^2$  は、0.63~0.87 と比較的高い相関を得た。すべてのグラフを一体化（省略）すると測定点のばらつきが顕著となるが、本水分センサは1つのセンサの信号の出力値を連続観測することにより樹体の水ストレスの程度を監視できると考えられる。

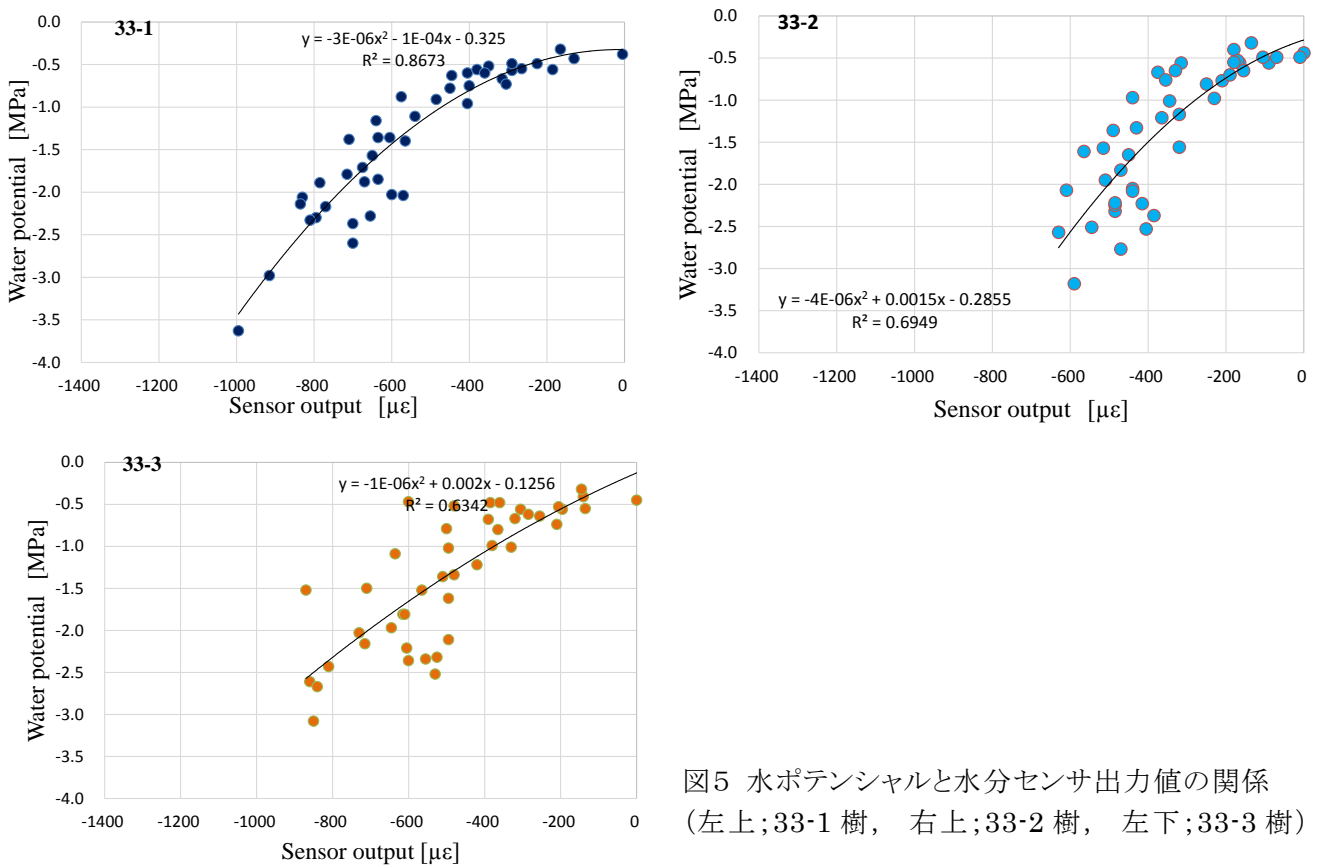


図5 水ポテンシャルと水分センサ出力値の関係 (左上;33-1 樹, 右上;33-2 樹, 左下;33-3 樹)

## 2. 無線式データロガーによるカンキツひずみ測定

有線式データロガーと無線式データロガーで測定した水分センサ出力の推移を図6に示す。有線式データロガー及び無線式データロガーの出力値の推移は、それぞれ破線、実線で示した。図内の矢印はかん水のタイミングを表す。2つの信号は非常に似通った挙動を示していることが確認でき

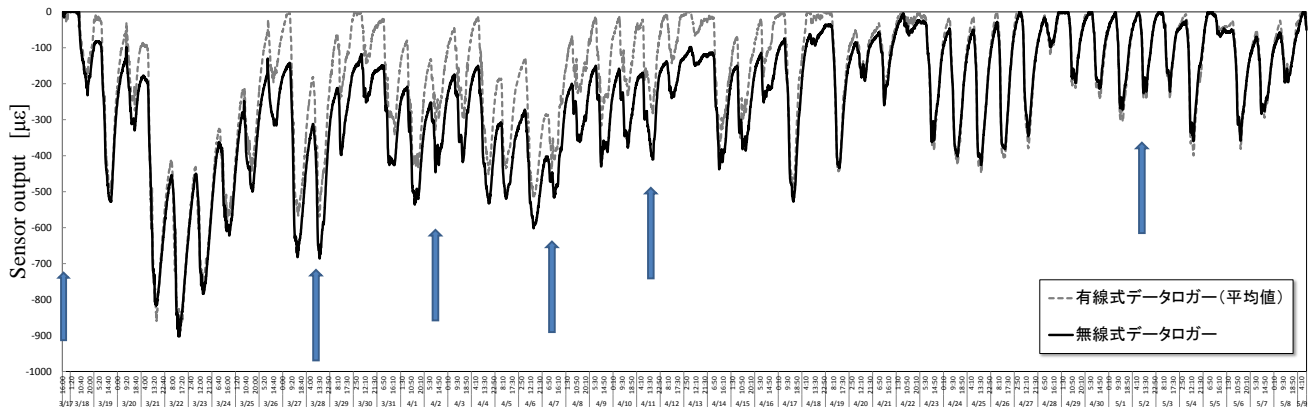


図6 “はるみ”を対象とした有線式・無線式データロガー信号出力値の推移 (2014.3.17~2014.5.9)

る。前節の甘平を対象とした水分センサの測定結果と同様に1日を単位としたひずみの増減が確認されており、曇天時でのひずみ低下の鈍化も確認された。また、測定初期(3/17~3/22)における測定値の大きな低下やそれ以後の回復の状況を見ても2つの信号の挙動は非常に近いものとなっている。さらに、測定後期(4/20頃以降)においては、両者はほぼ同じ値で移行していることがわかる。そこで、両者の関係をまとめると図7が得られる。横軸に有線式データロガーからの出力値を、縦軸に無線式データロガーからの出力値を示す。両者間には相関が非常に高く、線形近似した場合、決定係数 $R^2$ は0.9となった。グラフの傾きは1.0からやや外れているが、誤差範囲(無線式データロガーの増幅率調整ボリュームの設定誤差、異なる個所に水分センサを設置したこと起因する誤差、参照用センサの誤差等)であると言える。

以上の結果から、今回試作した無線式データ収集装置は、市販の有線式データロガーと比較しても遜色ない機能を有しているものと言える。

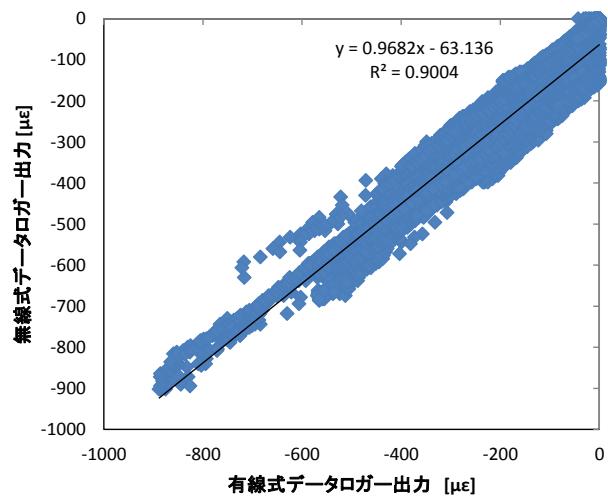


図7 有線式・無線式出力値の関係

## ま と め

植物の茎周囲長変化計測センサによりカンキツの水ストレスを評価する方法について検討を行い、以下の結果を得た。

1. 愛媛県産業技術研究所及び愛媛県農林水産研究が開発した水分センサのかんきつ系樹木に対する適用性について、みかん研究所ほ場内にある“甘平”を用いて約5か月間に亘り調査した。水分センサの測定値は、他の植物の茎の場合の挙動と同じように1日を単位として増減を繰り返し、葉の水ポテンシャルと非常に相関が高いことが証明された。
2. 水分センサをより使いやすい装置とするために、水分センサの信号を一時的にデータ収集装置に蓄え、無線式によりデータ回収が可能なデータ収集装置を試作した。“はるみ”の苗を対象とした有線式データロガーとの比較実験により、試作した無線式データ回収装置の有効性を確認した。

## 文 献

- 1) 仙波浩雅, 安西昭裕, 菊地敏夫: 植物の水ストレスセンサの開発(第一報)ー茎ひずみ評価センサおよび給液制御システムの開発ー, 日本生物環境工学会講演要旨集, 168-169(2011).
- 2) 安西昭裕, 仙波浩雅, 菊地敏夫: 植物の水ストレスセンサの開発(第二報)ー茎ひずみ評価センサにより給液制御した促成トマトの収量と品質ー, 日本生物環境工学会講演要旨集, 170-171(2011).
- 3) 仙波浩雅, 菊地敏夫, 安西昭裕: 植物の水ストレスセンサの開発(第三報)ー茎ひずみ評価センサの信頼性向上及び果樹への適用可能性ー, 日本生物環境工学会講演要旨集, 36-37(2012).