

新型ワイヤレス pF 計開発内容の紹介

大和田昭邦*, 石川義憲*, 飯間捺希*, 富永 章**

Overview of our New Wireless pF-meter Development

Akikuni Ohwada*, Yoshinori Ishikawa*, Natsuki Iima*, Akira Tominaga**

土壤水分の負圧を測定するテンシオメータ法に、新しい技術を適用することで、大幅な省エネや遠隔地でのデータ利用などが容易化できる。従来は実現困難であったことを、IT技術の進化と多様化が可能にしている。本稿では、pF計開発プロジェクトにおけるこれまでの取り組みの成果と達成状況を、公開可能な範囲で紹介する。

Several novel techniques are employed in measuring soil capillary suction using tensiometers, in order to enhance energy-efficient and better remote measurements. Recent advancements in IT have made achievable what was considered unattainable. This paper provides an overview of the outcomes and achievements resulting from our pF-meter project, within the scope of public disclosure.

Key Words : #土壤水分, #マトリックポテンシャル, #pF, #遠隔測定, #省エネ測定
#soil water, #matric potential, #pF, #remote measurement, #energy-efficient measurement

1. はじめに：なぜテンシオメータ式の pF 計が必要か

土壤の間隙水がもつ吸水圧の概念は、「土壤水のマトリックポテンシャル」として、物理学者バッキンガム(Edgar Buckingham)により 1907 年に確立され(文献[1]等参照)、その後世界で応用と内容の進展が徐々に進んだ。

植物の根は土壤水の負圧に抗して吸水をするため、強い負圧では水の吸収が困難になる。また、その負圧は土の斜面(法面)の安定を保つ重要な要素でもあり、負圧が弱まると地すべり等を起こしやすくなることが知られている(例:文献[2]等)。

土壤の吸水圧を直接測るためにはテンシオメータ(tensiometer)が使われる。近似的で容易な測定法や、毛管水よりも強い吸着力の領域まで測定可能なセンサなど、種々の装置が考案されてきた。その中で、本来のテンシオメータでの測定は、実用上重要な毛管水領域での正確な測定と、他の方式による測定値の校正用途にも欠かせない。

テンシオメータは、図 1-1 のように管の中を脱気水で満たし、底部のポーラスカップによって土壤の吸水圧と管内の水圧とを平衡させ、その負圧を測る仕組みである。

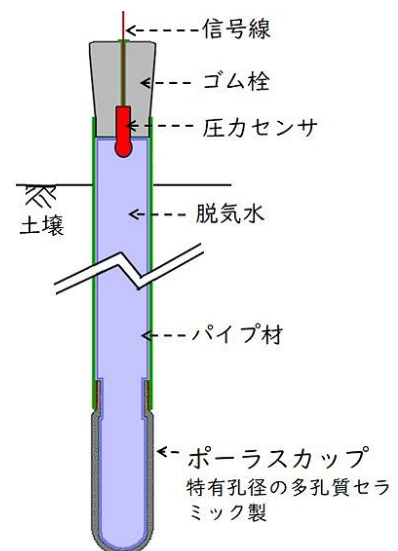


図 1-1 テンシオメータ模式図

2023 年 7 月 31 日

*:株式会社 Dynax T (Dynax T Co., Ltd.), **:PM ラボラトリー (PM Laboratory)

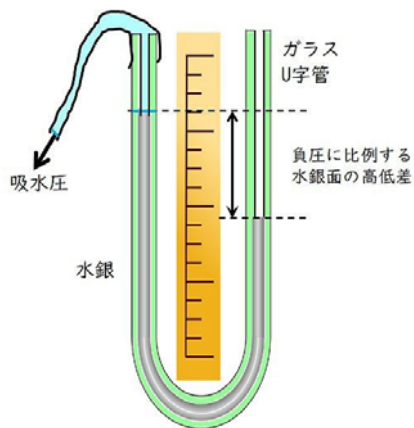


図 1-2 水銀マンノメータ



写真 1-1 水銀マンノメータによる深さ別 pF 測定
(1969 年 北海道中標津町大規模草地改良事業)

pF 値は負圧の「水頭」(単位 cm)の常用対数をとった値である(補足 A 参照)。用途の点ではテンシオメータの別名が pF 計であると考えても支障がない。

負圧の正確な測定には、かつてはガラスの U 字管を使う「水銀マンノメータ」が用いられた(図 1-2 および写真 1-1)。その後ブルドン管式圧力計などにも置き換わり、現代では圧力センサ部にデジタル式が使われることが増えた。中でも、進歩した MEMS (Micro ElectroMechanical Systems=微小電子機械システム)技術に基づく圧力センサは高性能化の一途を辿り、スマートフォンにも組み込まれるほど進歩した。テンシオメータに応用することで、精度、応答時間、省エネなどにおける飛躍的な性能向上が可能となる。

当開発では、測定点への電源や信号線などの引き込みを不要とする、ワイヤレスでのデータ送信や、測定部の大幅省エネ化による電池での長期駆動などの運用容易化を実現している。

これらの利点は圃場に限らず、例えば地すべり警報用として危険な測定箇所から離れた地点でのリアルタイムデータ取得を可能にする。同じ仕組みがマトリックポテンシャル以外のセンサ・データに対しても利用できるのはもちろんである。

本稿では、第 2 章に高性能テンシオメータのための物理的要件等、第 3 章には気密検査の方法、第 4 章に使用センサの特徴と仕組み、そして第 5 章で開発機器の特徴を公開可能な範囲で紹介する。また、本稿末尾には、補足 A、補足 B としてマトリックポテンシャルの表示方と、一般に理解されにくい水頭値に関して、SI 単位を含めた簡単な説明を付記する。

なお、マトリックポテンシャルは、真空以下の吸着領域までを含む「エネルギーポテンシャル」なのであるが、本稿では誰にも分かり易い毛管水領域のみを記述することとする。

2.テンシオメータの性能に影響する物理的な要件

図 1-1 の模式図に示したように、テンシオメータは筐体内を脱気水で満たすが、センサ部の気密や内部に生じる空気溜りなどが性能に大きな影響を与える。開発の過程で見出した現象の中から、pF メータで留意すべき物理的な要件について述べる。

2-1. 材質による熱膨張率の違いとその影響

テンシオメータのパイプには、アクリル樹脂か硬質塩ビ樹脂が使われる。その理由の 1 つは、どちらも熱による線膨張率 $\alpha=7 \times 10^{-5}/K$ であり、常温水の α ^{注1} に等しいことである。

しかしその固定観念は危険であり、常温から遠ざかると理由は覆される。室内で成り立つことが、露地では成り立たないことは多々ある。この場合 10 になるだけで水の線膨張率 α は激減する。水は 4 付近で 0 となる線膨張率上の特異な存在である。

密閉した容器の膨張率が中の液の膨張率と異なる場合、温度変化で見かけの膨張^{注2} が生じる。例えば、1L の密閉容器中の満水 1L の線膨張率 α の差を $\alpha = 10^{-4}/K$ とすれば、10 下降する際の容器容積と水体積の差は $V = 1L \times (\alpha \times 3) \times 10K = 1000mL \times (10^{-4}/K) \times 10K = 1mL$ であり、これが見かけの膨張となりテンシオメータの内圧を高めるため測定誤差を出す。また、その分の水がポラスカップから土壌へ滲出する。そのため、平衡に達する時間（応答時間）を延ばすと考えるわけである。

しかし詳細に見るなら、低水温で容器との差 $\alpha = 7 \times 10^{-5}/K$ はほぼ正しいが、実際に使われる内径 16mm の管では、仮に長さが 1m でも満水体積は 0.2L のみで、10 下降での見かけの膨張は $V = 0.14mL$ である。水を含む表面積 30cm² の標準的ポラスカップなら、その水量を通す時間はわずかであるため、平衡に達するのは早い。

この場合は温度上昇の方が問題で、収縮の際にある程度乾いた通常の土壌からはその水と空気を吸い内部の気泡を成長させる。その空気溜りの成長が、測定値への温度の影響をより大きく与えることが見出された。次項でその対策の重要性について述べる。

注 1) 線膨張率 α : 体膨張率 β のほぼ 1/3。 $1+\beta=(1+\alpha)^3=1+3\alpha+3\alpha^2+\alpha^3$ $1+3\alpha$ だから。

注 2) みかけの膨張 : 液体と容器の膨張率の差による液体体積と容器容積の変化の差。開放した容器では液面の上下を生じ、密閉した容器では大きな圧力差を生じる。

2-2. 内部の空気溜りが小さいほど精度・応答・脱気水保持期間が向上する

密閉容器内の空気溜りは、テンシオメータの測定値に悪影響だけを与える。密閉された気体は状態方程式 ($PV=nRT$) に従うため、温度変化による影響が大きい。

例えば、常温 20 から ± 10 変化すると、気体部分の圧力 P は $(293 \pm 10)/293 = \pm 3.4\%$ 変化して、測定値に直接悪影響を与える。もしそれを体膨張率 β に換算するなら $\beta = 3.4 \times 10^{-3}/K$ に相当し、固体や水の β より 2 桁程度大きい変化である。

空気溜りの体積を $v[mL]$ とすれば、+10 の上昇で $v \times 0.034[mL]$ の水がポラスカップ経由で土壌に滲出する。温度の下降では水だけを吸うのではなく土壌から空気も吸い込む。その量が v に比例するため、最初は少量でも幾何級数的に増え続けることになる。空気溜りは自分自身を増幅するポンプの働きをすることになり、悪循環を形成する。

その体積が増える分の水が出ていくわけで、テンシオメータの応答時間（平衡に達する時間）を遅らせるだけでなく、脱気水の保持期間の加速度的な短縮につながる。

実際に、初期の空気溜りがほぼない場合 ($v < 0.05mL$)、テンシオメータが土壌の吸水圧

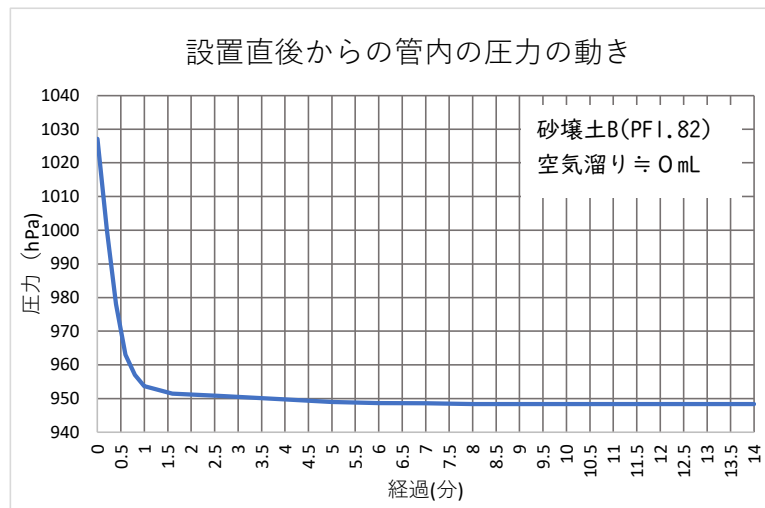


図 2-1 空気溜りのない pF 計がゴム栓閉栓から平衡に達する状況

と平衡するのに要する時間が極めて短いことがわかる。湿った砂壤土 (pF1.8) では pF 計のゴム栓閉栓から僅か数分以内で平衡に達する (図 2-1)。乾いた砂壤土 (pF2.41) でも約 10 分で平衡に達し、テンシオメータから滲出する水は極めて少ない (空気溜りが現れない)。

温度変化を多数回重ねた後で、小さな空気溜りが生じた場合、ゴム栓を開閉し水を補充する操作をしても、不平衡状態からは短時間で測定値に復帰する。したがって、空気溜りが小さい pF 計の運用においては、安心して水の補充ができる。

実際、その操作により通算の補充頻度は逆に大きく減る (水補充 1 回は、空気溜りが小さければ小さいほど多数回分の補充操作と同じ効果である)。それが上述の悪循環を断ち切ることになる。

まとめれば、製作時に空隙最小化が重要なのは、それが上述の幾何級数の初期値だからである。そして運用では、空気溜りが生じたら少量のうちに脱気水を補充する。それらが合わさり測定の正確さと迅速な応答時間を保ち、水補充頻度を大幅に減らすことになる。

2-3. 十分な気密性の確保と気密の検査

ポラスカップ以外の部分は外部との完全な気密が必要なことは言うまでもない。ところが必ずしも容易なことではない。例えば写真 2-1 の負圧センサモジュールでは、接続パイプ部にシリコンチューブ等を嵌めて圧力伝達をする。ところが、その部分でごく僅かな漏れを起こす場合がしばしばある。しかし測定値には影響が出ないので気づき難い。最終的には脱気水減少が速いため異常に気づく。

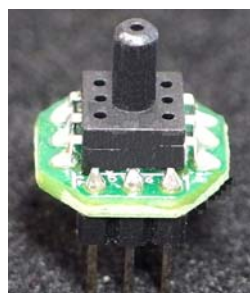


写真 2-1 精密負圧センサの一例

漏れが原因での空気溜りの生成が悪影響をもたらすことは前述のとおりである。したがってセンサ設置周辺の気密性の確保と、その検査は欠かせない。圧力伝達が不要な形式のセンサでも、例えば負圧部からの信号線引き出し用の導線では、接着剤や被覆と芯線との微かな間隙から気体がごく少しずつ漏れることがある。それを防止するため、信号引き出しには PEW 線または UEW 線を用い、エポキシ剤で固定と気密化を行っている。

気密の検査方法と、その必要性について次の章で述べる。

3. 気密の検査方法とその必要性

前述のとおり、センサの周辺でわずかな気密漏れを起こすことがあっても、漏れが少ない場合には通常の測定値には表れない。他の用途ではそれが問題のない場合もあるが、テンシオメータでは漏れは許されない。理由はその累積が空気溜りの発生・膨張と、脱気水の減少に直結するためである。

3-1. 気密テスト環境の設定と判定

気密性のテスト環境としては、アクリルパイプの一端に真空装置を取付け、パイプの反対端に検査対象の負圧測定部がセットできるようにするのが一般的であり、簡単である。精度を満たすためには、真空装置側でなく検査対象側で測定すると必要な精度が満たせるので合理的である。

負圧の設定は、例えば写真 3-1 のように、気密シリンダの任意の位置に固定できるように設定したピストンを使えば、比較的容易である。ただしこの装置自体も気密の確保は必須である。そのため、時々 O リングの清掃や水の塗布、また、シリンダやピストンを含め各部材の適宜の交換などが必要である。

検査方法例としては、凡その値に減圧した状態で停止し圧力を一定に保ち、ほぼ恒温の室内で 15 分経過させ、圧力読取値（分解能 1hPa 以下が必要）に変化がないことを確認する。変化がない場合だけ、気密の漏れがないとして検査をパスにする。

3-2. 漏れの量とその悪影響

例として、試験装置の内部気体空間が合計 6mL の場合について述べる。絶対圧力 500hPa（負圧約 513hPa, pF2.72）を加えた状態のままで停止する。圧力測定値に 15 分



写真 3-1 簡易な気密テスト環境

間変化がなければパスとする。例えば圧力測定値が1分間に1hPa変化する場合は、ポイルシャルルの法則にしたがい1分間で内部の気体6mLの1hPa/500hPa分が漏れている。これを1日当りに換算すると次の量になる。

$$(6\text{mL}/500)/\text{min} = 0.72\text{mL}/\text{hour} = 17.3\text{mL}/\text{day}$$

つまり、この負圧の強さの場合には、1日で17.3mLの空気が、気密漏れの箇所を通過してテンシオメータ内部に侵入することを意味する。

テンシオメータのパイプ内径が16mmの場合、水面が1日で8.6cm下降することとなり、重大な漏れにすぐ気づく。ところが、吸水圧の計測値だけを見るなら値は妥当に見えるため、漏れには気づかないケースが生じる。空気溜りに侵入した空気量と同体積の脱気水が、ポラスカップを通じて周囲の土壤に滲出し、値の低下にも影響している。

空気溜りを容易には作らない装置にするには、漏れを皆無にする必要があり、そのために気密への十分な留意と検査が欠かせないのである。

3-3. 負圧センサでのテストの考慮点

絶対圧センサが内蔵真空室との圧力差を測るセンサであるのに対し、負圧センサ(=ゲージ圧センサ)は大気圧との差を測る。負圧センサの場合で、応答時間が長い(例30秒)センサを使う場合には、大気圧の変化が気密試験に影響することがある。

そのため、負圧センサのテストは大気圧を計りながら行い、急な気圧変化があれば試験をやり直す。15分で数hPaの変化が生じることは頻繁ではないが、実際にある。絶対圧センサを用いる場合の検査であれば、このような大気圧の考慮は要らない。

4. 当開発におけるセンサの選択

テンシオメータ本体やセンサ周辺の材料、接着剤(硬化剤・溶着剤・充填剤)の選択や、気密確保の工夫を色々試行錯誤した。気密のほかに最も重要なことは、センサ周辺の空隙を(たとえ0.5mLでも)構造的に不要にすることである。その空隙は初めから空気溜りの体積の初期値になるからである。

当開発中に考案され、最終的には「没」としたセンサ部の試作例を、写真4-1と図4-1

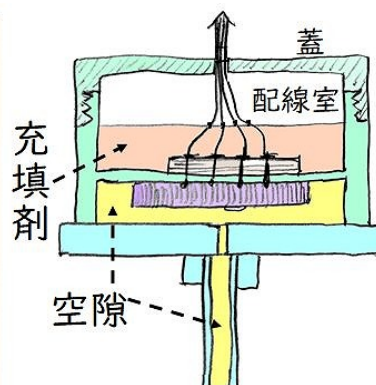


写真 4-1 不採用のセンサ部試作品の例 図 4-1 不採用のセンサ部試作品の断面

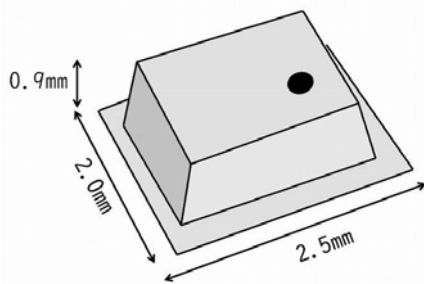


図 4-2 センサ筐体の外観

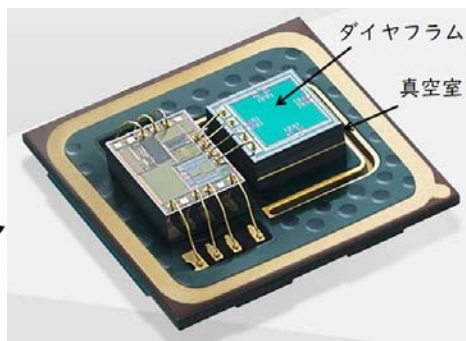


図 4-3 センサ内部の構造^{注1}

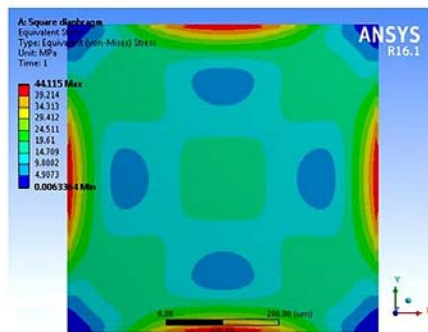


図 4-4 ダイアフラムの応力解析^{注2}

注1) 図 4-3 の出典:www.bosch-sensortec.com (説明を加筆)

注2) 図 4-4 の出典:Y. Guo, et al. Sensors 2016, 16(1), 55; doi:[10.3390/s16010055](https://doi.org/10.3390/s16010055)

に示す。気密は完全で計測も正確にできる。そして配管用にもゴム栓への直接挿入用にも使える、良いアイデアである。

しかし、センサ周辺の空隙を少しでも小さくする方が有利である点が確認された後は、この構造はセンサ部には使用していない。

当開発では最終的に、進んだ MEMS 絶対圧センサを特別な工夫により防水し、確実な気密処理を行うことで優れた性能を実現している。

それにより、製品での漏れの可能性をゴム栓とアクリルパイプの間だけに絞り込めるように改善してきた。ユーザーが使い易い計器とするためには、気密上の注意点を「ゴム栓をしっかり閉める」ことだけにしたいわけである。

図 4-2 に使用しているセンサ筐体の外観を示す。図 4-3 はその内部構造であるが、右側に位置するセンサの土台は超小型真空室で、上面が 1mm 角に満たないダイヤフラム構造になっている。

このダイヤフラムへの外気圧による応力の分布は、有限要素法(FEM)により図 4-4 のように解析されている。応力極大の箇所 4 点にピエゾ抵抗を配し、ブリッジが構成されている。実物の顕微鏡による写真 4-2 でもその様子がわかる。ブリッジで検出される電位差は、センサ内蔵の MCU(Micro Controller Unit)により 16 ビットの圧力データに変換される。

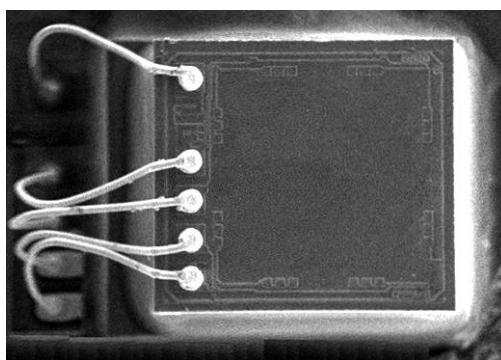


写真 4-2 ダイアフラム実物の 200 倍拡大
(4 辺にピエゾ抵抗のブリッジ配線が薄く見えている)

当センサの絶対精度 (absolute accuracy) は 30kPa ~ 110kPa の間では $\pm 0.1\text{kPa}$ (0 ~ 60) から $\pm 0.17\text{kPa}$ (-20 ~ 0)で、分解能 (resolution) は $\pm 0.00066\text{kPa}$ である。なお、 pF2.86 を超える 30kPa ~ 0 k Pa の範囲については、開発対象ファームウェアで非直線性を補正する。

当開発では正確な負圧を測定値とするよう工夫がなされている。センサ毎の個体差については、関連する複数センサ間の測定値の差額を装置毎に与える方法で相殺することで、すべての測定値の絶対精度を分解能の近くにまで向上している。

この MEMS センサの使用により、当開発では次の から の利点が得られた。

測定部・送信部のコンパクト化

正確で安定した測定値

空気溜りの最小化

テンシオメータ内の気密容易化

さらに、上記 と によって次の と の成果に結びついている。

迅速な応答性能

脱気水の持続期間拡大

5. 開発対象機器の主な特徴と要点

本システムの構成概要を図 5-1 に示す。開発対象の主要な機器は、 テンシオメータを含む「測定・送信部」、 「データ受信・処理部」、そして電波到達距離を補うことができる「中継部」である。

以下、これらについて、現時点での公開可能な範囲に絞り、簡単に紹介する。

5-1 測定・送信部

電池で駆動する測定送信部の試作器(写真 5-1、未 SMT 化段階)は、電源を含め約 6 cm角

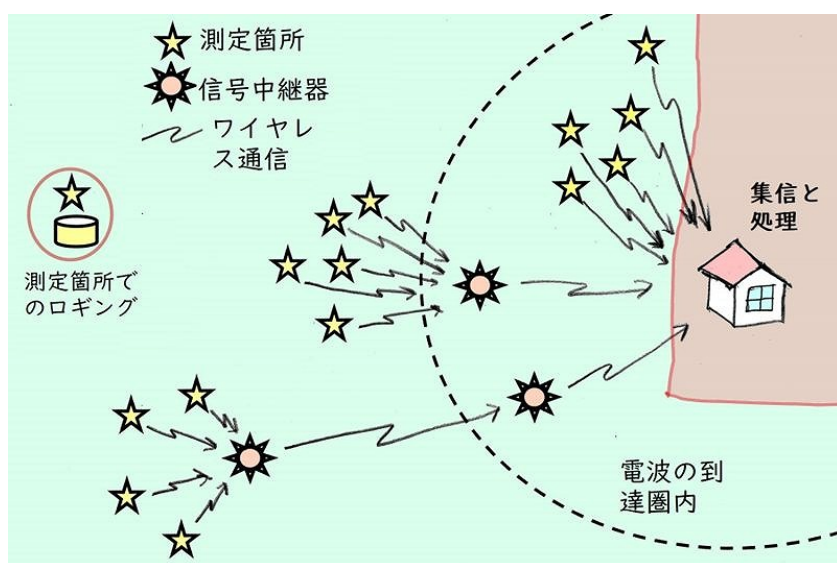


図 5-1 システム構成の説明図



写真 5-1 測定・送信部

に収まり、配線不要で設置が楽である。挿替可能 EEPROM を用い個々の変数(測定器 ID、データ宛先、計測間隔、個別センサ毎のキャリブレーション用アジャスター値) を外から与えている。測定送信部の試作器の電池消費電流を写真 5-2 に示す。測定時の処理は、外部定数を読み込んだ後、pF、温度、供給電圧等を測定し、データを組立てて送信し、受信装置への到着確認をする。その全処理時間は 0.47 秒である。省エネのため、指定計測間隔の残り時間は Deep Sleep モードを保つ。

また、更なる省エネのため、内部に MOSFET によるスイッチを備え、センサや供給電圧監視回路等への電流供給は、不要時に全て停止している。電源には高効率かつ LIQ(low quiescent current=静止時低電流)の DCDC 降圧コンバータを用い、Sleep 時の電池消費電流を 20 μ A 以下にしている。これらにより、電池駆動で 1 年を超える持続期間を実現している。

受信装置 (または中継装置) との通信には、802.11b の非 http プロトコルを用い、消費電流を抑えかつ到達距離を伸ばしている。なお全ての電波は技術基準に適合しており、システムの全機器は技適マークを付した「技適取得済無線モジュール」である。

5-2 データ受信・処理部

測定・送信器多数から測定データを、直接あるいは中継器経由で全て受信する。
現時点の試作器の機能は、当面次のものである。

受信データにタイムスタンプを与える

受信データを逐次表示する

全データをマイクロ SD カードへ長期間ロギングする

クラウドにデータをアップロードするなどの様々な処理への対応が可能である。最終的に種々のニーズに応えるようにしたい。データ集信部であり電源は常時オンとする必要があるため、商用電源から供給する。

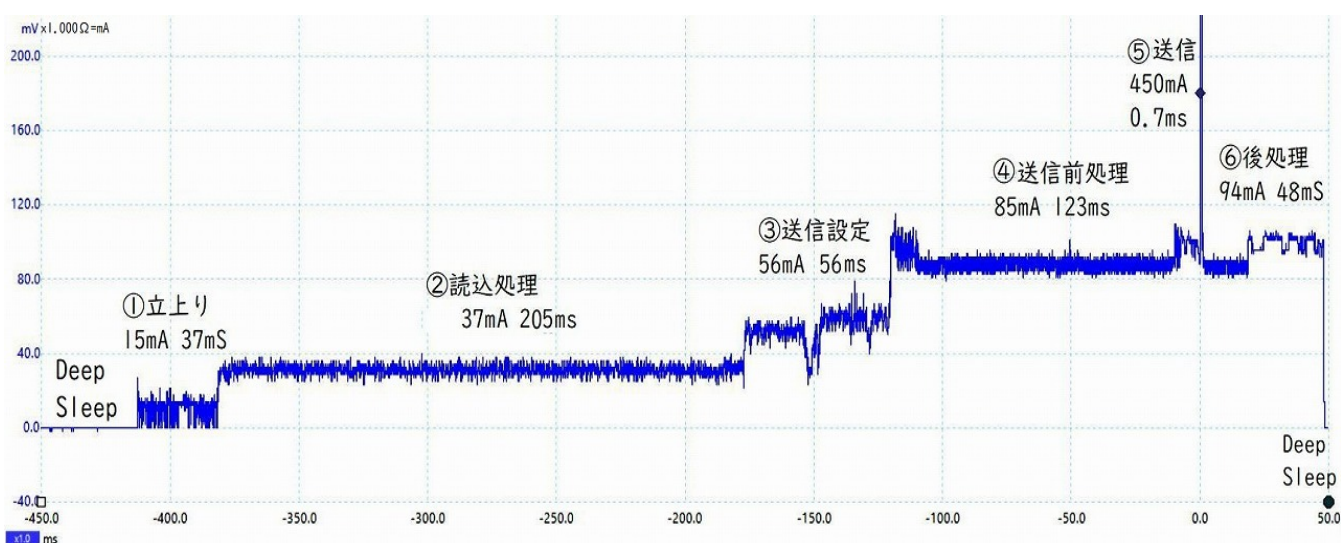


写真 5-2 測定・送信部の電池電流計測内訳 (UK Pico Scope 使用)
(1 回あたり合計 27mAs、10 分間隔測定では平均 65 μ A 未満を達成)

5-3 中継部

データ受信・処理器が電波到達範囲を超える位置の測定・送信器をカバーするために、中継器を開発している。その機能自体は既にテスト済である。距離が長い場合でも本中継器 1 台または複数台を介することができるので、受信器までの距離の制限がなくなる点が、本システムの大きな特徴の 1 つとなる。

電源は現時点で 2 種類を考えている。測定器側で指定する測定間隔と送信器の対象台数に応じて、電池駆動型とソーラー電源駆動型である。多くの場合は設置・運用が手軽な電池駆動により対応できるよう開発推進中である。

6 おわりに

現時点までの開発内容の一端を紹介すべく、公開可能な範囲を簡単にまとめた。開発中でもあり筆を尽くせない点はあるが、何卒ご容赦をいただきたい。ご関心をお持ちの多くの方々に、本稿が少しでも参考となれば幸いである。末筆ながら当開発にご支援とご協力を頂いている多くの関係各位に、紙面を借り深く謝意を表す。皆様のご支援を励みとして、優れた pF メータの実現に向けて努力を継続する所存である。

直接記載した以外の参考文献：

- [1] John R. Nimo and Edward R. Landa, “The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham”, Soil Science Society of America Journal #69, Madison, WI 53711 USA, pp328-342, 2005. 要約が次の URL に掲載されている：
<https://web.archive.org/web/20060602062838/http://soil.scijournals.org/cgi/content/abstract/69/2/328>
(2021 年 10 月参照)
- [2] Sara Pajeric, et al., Monitoring and Data Analysis in Small-Scale Landslide Physical Model, Applied Science, 2021, 11, 5040. <https://doi.org/10.3390/app11115040> (2022 年 10 月参照)
- [3] Yue Guo, et al., Bio-Inspired Stretchable Absolute Pressure Sensor Network, Sensors Journal, Vol.16 Issue 1 doi: 10.3390/s16010055,
<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/1/55> (2020 年 9 月参照)

補足 A) 土壌の吸水圧の表し方

① マトリックポテンシャル

土壌水がもつ負圧の大きさ。圧力[kPa]で表現されることもあるが、水頭（水柱の高さ）で表現されることが多い。水頭の単位は[m]または[cm]で、負圧も正の値で示されるのが普通である（負で表されるケースもないわけではない）。圧力と水頭の換算法は、単位換算を含めて補足 B) に示す。

② pF

土壌水の吸引圧の大きさを、正の水頭 h [cm] の常用対数で表した数値、つまり、 $pF = \log_{(10)} h$ で、単位はなく数値の頭に pF と記す。

補足 B) 圧力と水頭および pF への換算

以下の符号を用い単位を [] 内に示す。*は乗算で、水頭をここでは Wh(water head) と表記する。水柱の高さを H [m] 底面積を S [m²] 体積を V [m³] とし水の密度を ρ [kg/m³]、水柱の質量を M [kg]、重力加速度を G [m/s²] とすれば、体積は V [m³] = H [m]* S [m²] だからその質量は M [kg] = ρ [kg/m³]* V [m³] = ρ * H * S [kg] となる。

水柱底面に働く力は F [N] = M * G [kg*m/s²] = ρ * H * S * G [N] である。

よって水柱底面の単位面積当りの力つまり圧力 P [N/m²=Pa] と水柱高 H [m] の関係は次式になる。

$$P[\text{Pa}] = \rho * H * S * G[\text{N}] / S[\text{m}^2] = \rho * H * G[\text{N}/\text{m}^2]$$

ここで $G = 9.80665$ [m/s²]。 ρ に 1000 [kg/m³] を使う^{注1} と、

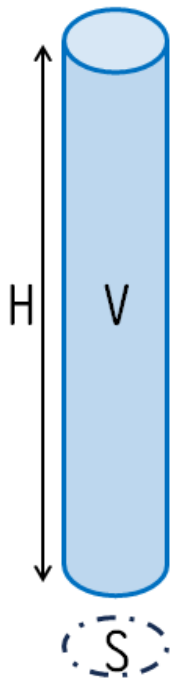
圧力 P [Pa] = $H * 9806.65$ [N/m²] となり h [cm] の水頭 h [cmWh] 換算は

P [Pa] = h [cmWh] * 98.0665 [Pa] となる。また、水頭は

h [cmWh] = P [Pa] / 98.0665 = h [hPa] / 0.980665 = k P[kPa] / 0.0980665 になることがわかる。

pF は水頭 h [cmWh] の常用対数値であり、上記のことから hPa から pF 値への換算は次の式となる：

$$pF = \log_{(10)} (h\text{Pa} / 0.980665) \text{。}$$



注 1) ρ の値は 0°C で 999.84、3.98°C で最大値 999.97、20°C で 998.20、30°C で 995.65 と下がるが、沸点近くでも 959.06 である。便宜上 1000 が使われる。

以上