QUSPIN
AN ATOMIC DEVICES COMPANY

物理探査用光ポンピング磁力計

QTFM Gen-2

光ポンピング磁力計「QTFM Gen-2」は、低ノイズ及び高精度で磁場測定ができる高性能の磁気センサです。小型で低消費電力で、ドローンなどの測量にも使用できます。QTFM Gen-2 はセットアップが簡単で、使いやすく、信頼性が高いです。

- 高感度
- 小型
- ポータブル
- 幅広い使用温度
- PC 接続で簡単操作、UARTの接続

用途

- 磁気異常検出
- 鉱物とエネルギー探査
- ドローン・無人探査機等

NANOXEED

仕様

技術仕様（暫定版）

感度スカラー	< 3 pT/√ Hz　ベクトル : < 0.1 nT/√ Hz （オプションで追加可能）
データレート	1000 サンプル / 秒 (最大)
バンド幅	500 Hz
デッドゾーン	軸方向のみ、地磁気に対して ±7° 未満の円錐形（典型的には 5° 未満）
方位誤差	<3 nT 非補償型
ダイナミック範囲	1000 nT から 150,000 nT
動作温度	-15℃～ 55℃
寸法	36×17.8×11.6 mm（センサーヘッド）、 91×20×14.4 mm（エレクトロニクス部）
重量	15 g（センサーヘッド + 電子回路）
電源	5V ～ 10V 入力、合計 2W（センサー + 電子機器）、 起動時 3W
出力	UART、USB
最大勾配磁場	300 nT/cm
校正	なし
型式	パルスレーザー励起ルビジウム 自由誘導減衰法

特長

- ▶ オプション追加：組み込み、安定、低ノイズ 3 軸ベクトル出力（合成※）
- ▶ フラットな分光特性（周波数に依存した特性のロールオフなし）
- ▶ カスタマイズ可能なデジタルフィルター（ローパス、ハイパス、ノッチ）を内蔵
- ▶ 複数のセンサーを高精度に同期させてグラジオメトリーを行うことが可能
- ▶ デッドゾーンはほぼなし
- ▶ スルーレートの制限なし（極めて磁気ノイズの多い環境にも対応可能）
- ▶ 高分解能周波数カウンターを内蔵

※ 1 ベクトル出力は、インターリーブされた測定サイクルでバイアスフィールドを適用することにより、スカラー測定から合成的に導出（計算）される。

新しい点は？

G2 は、弊社の G1 センサー（2017 年）を大幅にアップグレードした製品です。G1 もすでに最もコンパクトで高感度な市販のスカラー磁力計でしたが、今回の G2 はさらに進化を遂げています。

より堅牢に ▶ 新型 G2 は、厳しい地球物理学的用途に対応するため、大幅に堅牢化されて頑丈になりました。

スルーレートの制限がなし ▶ G2 はアンロックなしの磁場環境で、任意に変化するノイズや速度に耐えることができます。

デッドゾーンはほぼなし ▶ G1 が平面的なデッドゾーンが大きかったのに対し、G2 は軸方向のデッドゾーンはごくわずか(+/- 7 度円錐)です。このため、G2 はどの緯度でも方位を気にすることなく使用することができます。

帯域幅の拡大 ▶ G2 では、磁場は 500Hz でサンプリングされます。この高速サンプリングと内部デジタルフィルターにより、センサープラットフォーム（UAV/UUAV）やその他のノイズ源から誘発されるエイリアシングアーチファクトを回避することができます。

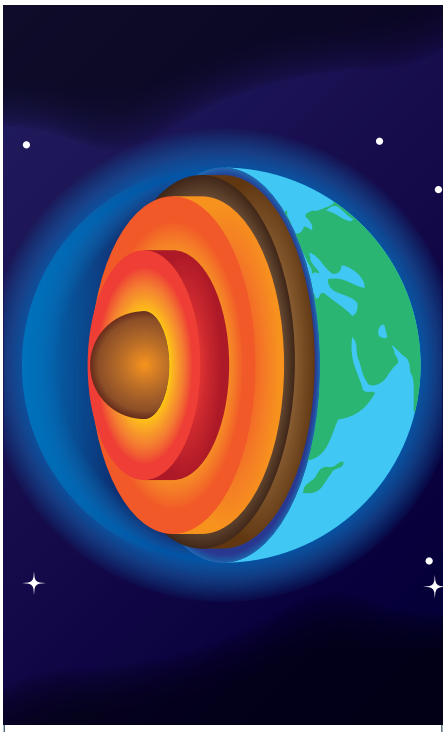
グラジオメーターモード ▶ 複数のセンサーを簡単に連結することができ、非常に高い同相ノイズ除去比（CMRR）を持つ合成グラジオメーターを形成することができます。

三軸ベクトルアタッチメント ▶ 多くの高性能磁気異常検出アプリケーション（MAD）では、内部および外部の「方位誤差」を取り除くために、外付けのベクトル磁力計が必要です。G2 は、センサーヘッド上に小さな 3 軸アタッチメントを取り付けることで、純粋なスカラー磁力計からスカラー + 3 軸のハイブリッドベクトル磁力計になります。G2 は、世界初のスカラー + ベクトルのハイブリッド型原子磁力計として、優れた性能を発揮します。

高機能エレクトロニクス ▶ G2 は、強力な ARM マイクロコントローラーと Xilinx FPGA を備えた高機能エレクトロニクスコントローラーを搭載しており、多くの新機能と設備を提供します。

修理性 ▶ 不測の事態で G2 が壊れた場合（UAV を落とすなど）、迅速かつ穏当な価格で G2 を修理いたします。

用途

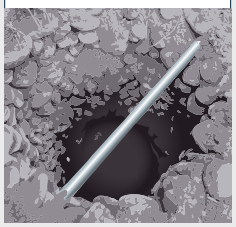


地球物理学

鉱物探査

考古学

古井戸・
古い油田調査



古い油田や古井戸は、道路建設、区画整理などの開発業者にとって、環境、安全の観点から調査の必要があります。一方でこの調査自体にはいくつかの課題があります。

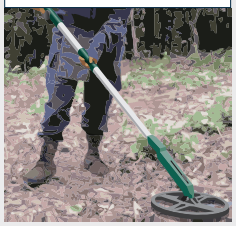
【安全性】リスクを最小限にしてフィールドの調査をする必要があります

【費用対効果】広大な敷地から効率的に対象を見つける必要があります

【データ】既存のデータ（地図等）との統合が必要です

これらの条件を満たす技術として、光ポンピング磁力計が有効な可能性があります。すでにドローンに掲載して古井戸、古い油田などの調査に使用されております。

不発弾検知



不発弾検知とは、地中に埋まった不発弾を磁気センサなどを用いて探査することです。第二次世界大戦中の大規模な空襲によって日本には多くの爆弾が投下されましたが、その内の一部は不発弾としていまだに処理されず残っています。

不発弾の多くは地中に埋まっているため、どこにあるかを人の目で見つけることは極めて困難です。かつては金属探知機を用いた不発弾検知が行われていましたが、検出範囲が狭くて地中深くにある不発弾を検出できないという課題があり、今では主に地表近くに設置される地雷の検出に用いられています。

現在の不発弾検知の主流は、磁気センサを搭載した検査装置を用いる方法です。多くの爆弾の外装は鉄や鋼などの強磁性体で作られており、それらが発する磁気を検出することで大きさや位置、深度を測定しています。不発弾検知においては、触発事故を防ぐために高精度な検出ができなければなりません。高精度な磁気センサの開発や検査装置の改良によって、日々性能の向上が図られています。

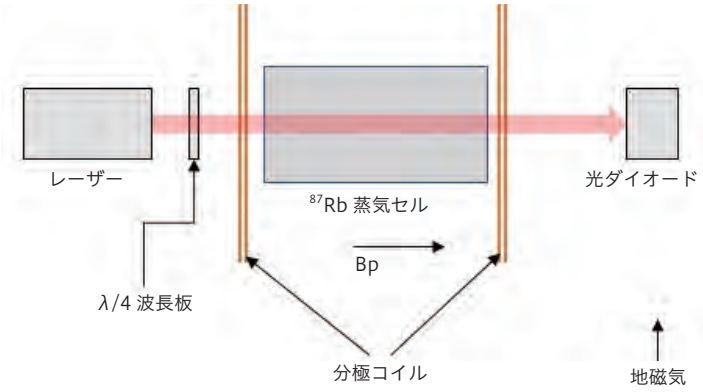
QTFM Gen-2 の構造

QTFM Gen-2 は、自由誘導減衰（FID）と呼ばれる光学検出方式に基づく、ルビジウム光ポンピング磁力計（OPM）です。その基礎となる物理と動作について、以下に説明します。

［図右］は、磁力計センサーヘッドの光学的な説明図です。まず、795 nm の VCSEL レーザーからの光を 1/4 波長板で円偏光にします。次に、円偏光された光は、透明なルビジウムの蒸気セルを通過します。蒸気セルを通過した光は、光検出器で捕捉されます。ルビジウムの蒸気圧を上げるため、蒸気セルは電気的に約 80℃に加熱され、レーザー波長をルビジウムの D1 光学遷移に電子的にロックします。

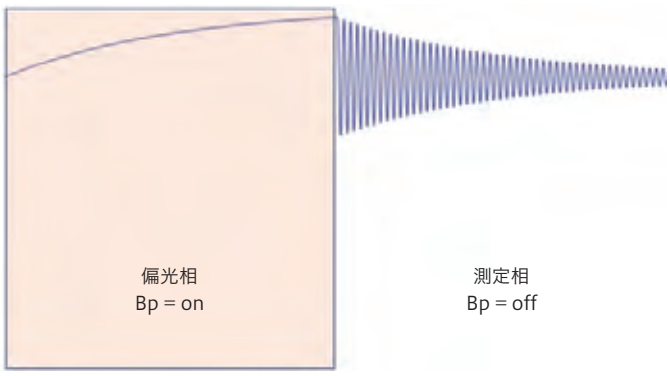
センサーの動作は、1 ms（サイクルタイム）ごとに繰り返される 2 つのフェーズに分かれています。最初の 500 us は、蒸気セルを包む一組のヘルムホルツコイルを使って、光ビームと平行な強い偏光磁場（Bp）を作り出します。光ビームと縦方向の偏光磁場の組み合わせにより、ルビジウム原子はスピン偏極（偏光磁場と一直線に並ぶ）されます。次に、偏光電場を 1 us 以下で急速にオフにします。偏光場がオフになると、測定フェーズに入ります。

光学系説明図



自由誘導減衰型（FID）磁力計の説明図

光ダイオード出力



フォトダイオードの出力を時間の関数として表示

偏磁場を急激にオフにすると、ルビジウム原子は地磁気に対して歳差運動（振動）します。ルビジウムの歳差運動の周波数は、バックグラウンド磁場に正比例します。ルビジウム原子の歳差運動は、蒸気セルを通過する光を変調させるため、オシロスコープに接続した増幅フォトダイオード出力などでリアルタイムに観察できます［図左］。QTFM Gen-2（M）では、この歳差運動は約 500 us 続き、このサイクルの測定段階となります。

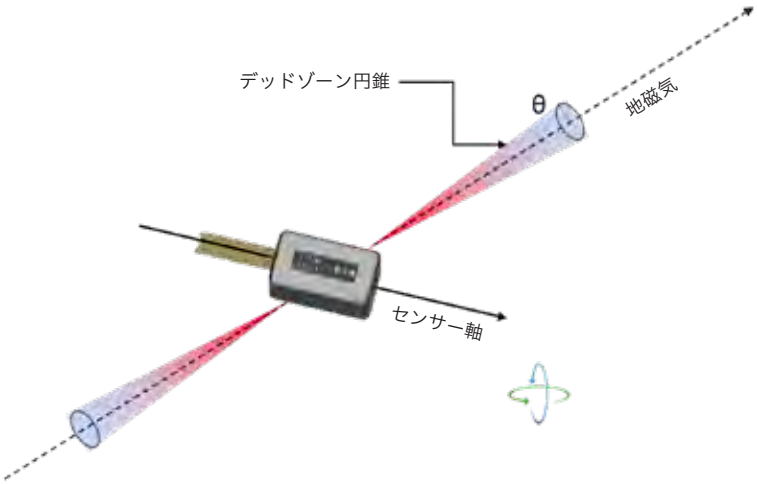
測定段階では、フォトダイオードからの生の電気出力が増幅され、内蔵の高性能周波数カウンターに送られます。周波数カウンターはルビジウムの歳差運動を測定し、バックグラウンド磁場と歳差運動の周波数が 6.998 nT/Hz という一定の関係にあることから、バックグラウンド磁場の正確な値を推測することができます。例えば、歳差運動周波数が 350 kHz と判明した場合、バックグラウンド磁場は 50014.289 nT と決定されます。1 ms サイクルで、1 回の磁場測定が行われます。

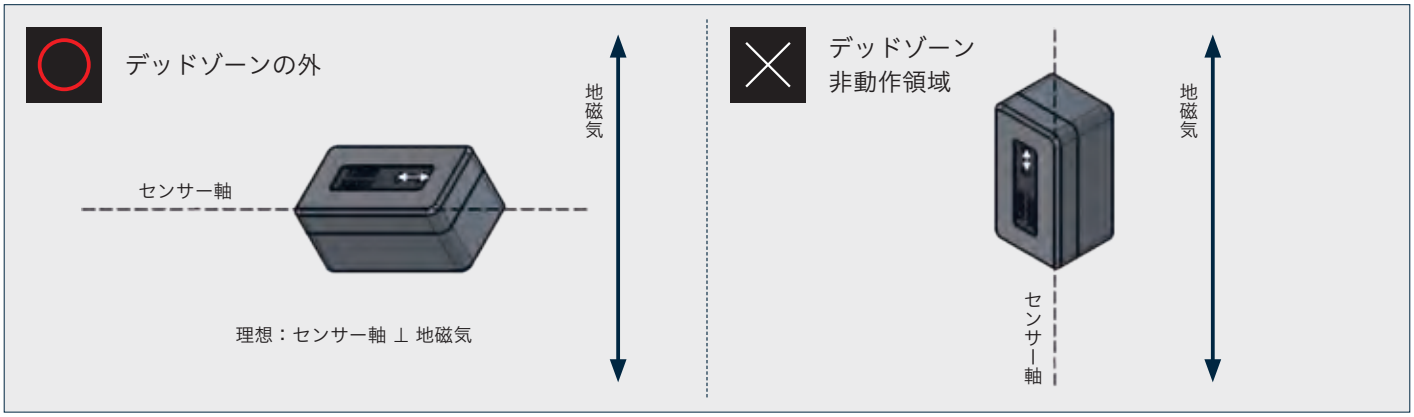
歳差運動の周波数はバックグラウンド磁場の大きさ（$\sqrt{(Bx^2 + By^2 + Bz^2)}$）にのみ依存し、個々の磁場ベクトル成分（Bx, By, Bz）には依存しません。このため、QTFM-Gen 2（M）はスカラー磁力計、つまり「全磁場」磁力計であり、QZFM やフラックスゲートのようなベクトル磁力計ではありません。

デッドゾーンについて

QTFM Gen-2 のデッドゾーン

QTFM Gen-2 は、センサーヘッドの黒い矢印で示されたセンサー軸が、地磁気の方向に 7° の錐の中に入ると、非動作領域または「不感帯」に入ります。
この間に収集されたデータは無効とみなされ、自動的にそのようなフラグが立てられます。しかし、センサーヘッドの向きがデッドゾーンから離れると、すぐにセンサーは再び使用可能になります。
QTFM Gen-2 のデッドゾーンは、軸方向のデッドゾーンが 1 つだけという、業界最小の製品です。



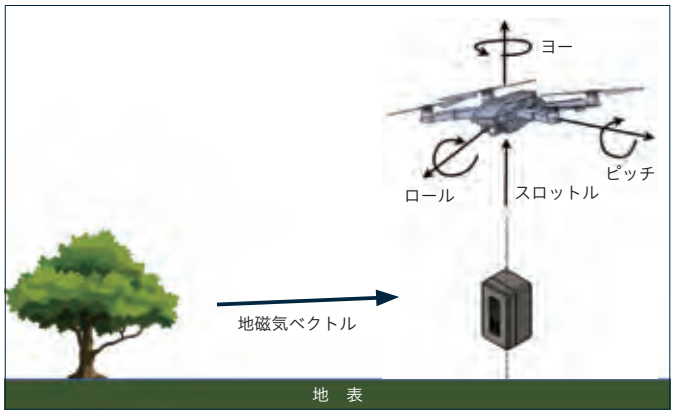


デッドゾーンを生まないために

赤道から離れた地域で推奨される センサーヘッドの向き

赤道から離れた地域（米国、欧州など）では、地磁気は地面に対してほぼ垂直になります。そのため、360° 左右方向の機動性を確保するために、センサーヘッドをセンサー軸と地面が平行になるように取り付けることを推奨します。

赤道付近の地域で推奨される センサーヘッドの向き



赤道付近では、地磁気は地面とほぼ平行です。そのため、360° 左右方向の機動性を確保するには、センサーの軸が地面と垂直になるようにセンサーヘッドを取り付けることを推奨します。

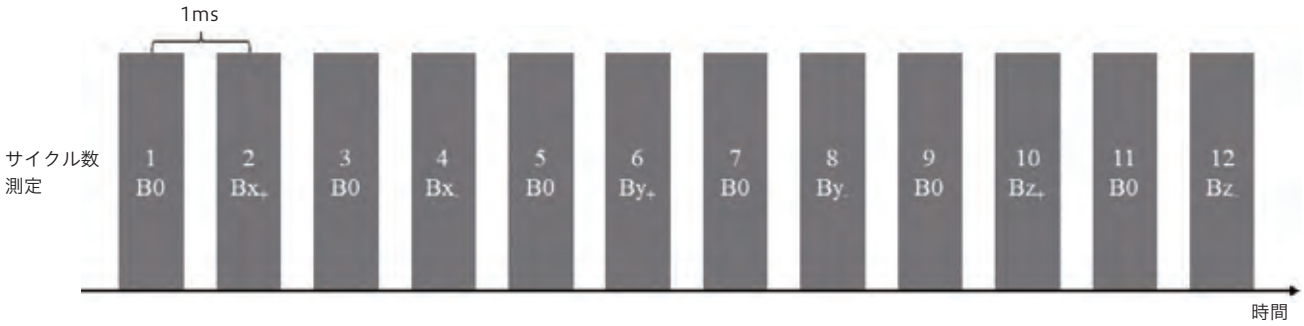
QTFM ベクトルモードの運用

QTFM Gen-2 でベクトル場測定を出力するには、アドオンの 3 軸コイルアタッチメントが必要です。コイルアタッチメントをセンサーヘッドの上をスライドさせ、フレキシブル・リボンケーブルで電子機器コントローラに接続します。

QTFM は本来、全磁場磁力計であるため、B0 しか測定できません。しかし、QTFM G2 にコイルを装着することで、あらかじめ決められた Bx、By、Bz のオフセット磁場を順次印加できます。バイアスコイルを ON/OFF したときの B0 の変化を測定し、バックグラウンド磁場のベクトル成分を数学的に算出します。

QTFM Gen-2 はパルスモードで動作し、1 ms ごとに繰り返されるサイクルの中で 1 回の磁場測定が行われます。スカラーモードでは、各サイクルで全磁場（$B0=\sqrt{(Bx^2+By^2+Bz^2)}$）の測定が行われます。ベクトル・スカラーハイブリッドモードでは、下図のように全磁場とベクトル成分の測定が交互サイクルで行われます。

QTFM G2 3 軸ベクトル用コイルアタッチメント



サイクル 1、3、5、... では、センサーは B0 を測定します。サイクル 2 と 4 では、Bx コイルが作動し、そこから Bx 磁場成分の 1 つの測定値が得られます。同様に、By 成分はサイクル 6 と 8 から、Bz 成分はサイクル 10 と 12 から導かれます。ハイブリッド・スカラーベクトルモードでは、B0 の最大データレートは 2 ms/ サンプル、Bx、By、Bz は 12 ms/ サンプルです。

利点

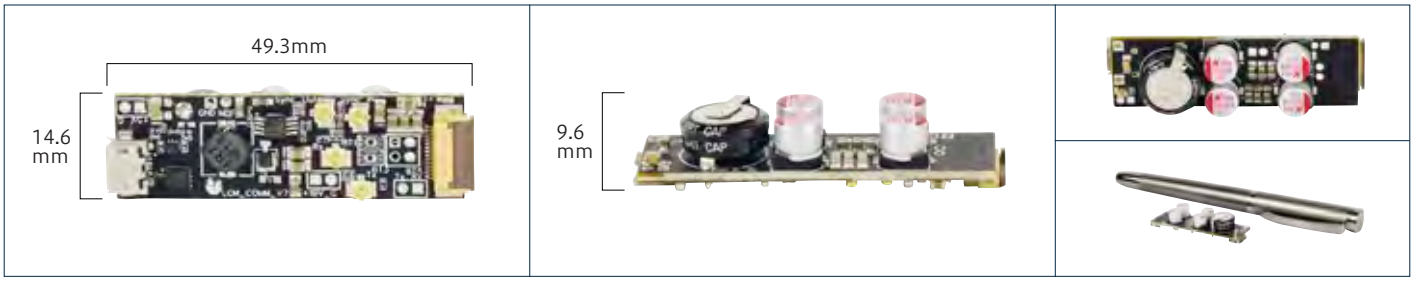
- フラックスゲートと比較して、QTFM ベクトル出力は非常に安定しており、顕著な長期ドリフトや温度係数はありません。
- 高感度
- B0, Bx, By, Bz が単一のデバイスで同じ検知領域から測定できます。

制限

- 10 μT ～ 200 μT の地磁気での動作用に設計されています。
- センサーヘッドがデッドゾーンに近づくと感度が落ちます。

スタンダードボード

QTFM Gen-2 標準通信基板



商品の説明

全ての QTFM Gen-2 センサーには、標準通信ボード（SCB）が付属しています。この SCB は、USB ポートを使用して QTFM Gen-2 を PC に接続するための橋渡し役です。現場で使用する前に、SCB を付けてセンサーをテストすることをお勧めします。標準通信ボードには以下のものが装備されています。

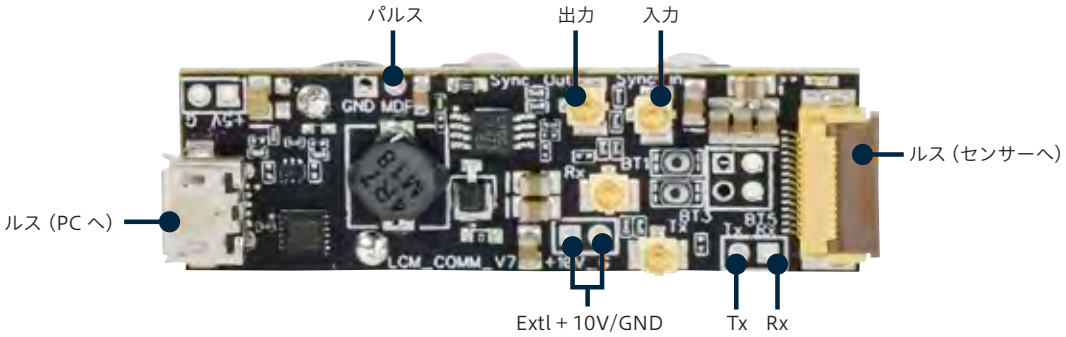
❶ USB-UART ブリッジは、センサー電子回路（ECU）から PC に仮想 COM ポートを介して生の UART 信号を送信します

❷ USB からの +5V を ECU が必要とする +10V に昇圧するスイッチングレギュレータを搭載しています

❸ スーパーキャパシタによる USB 電圧のクリーンアップと安定化

❹ 同期入出力、MDP（マグ・データ・パルス）、生 UART にアクセス可能

電子回路図



SCB を接続

❶15 ピン FPC コネクタ：センサー電子回路（ECU）からのフレックスケーブルを SCB の 15 ピン FPC コネクタに接続します。

❷USB ケーブル / 型式 A からマイクロ -B：片方を SCB に、もう片方を PC に接続します。

❸SCB には UART ブリッジがあり、プラグインすると PC 上に仮想 COM ポートが作成されます。作成された新しい仮想 COM ポートは、デバイスマネージャで確認することができます。

❹シンクアウト（UMCC コネクタ、出力）：1 kHz、3.3V の矩形波。立ち下がりエッジが磁界測定開始時刻を示します。マスターセンサーからのシンクアウトをスレーブセンサーのシンクインに接続すると、マスターセンサーとスレーブセンサーが完全に同期し、同じ瞬間に磁界測定を行うことができます。

❺ Sync in（UMCC コネクタ、入力）：2 つ以上の QTFM Gen-2 センサーを同期させるための 1 kHz、3.3V の矩形波を受け入れます。

❻マグ・データ・パルス（MDP）：3.3V 出力パルス。MDP は、センサーが自動起動を完了するまでローレベルを維持します。MDP の立ち上がりエッジは、ジッターフリーのタイムスタンプ磁力計データに使用することができます（印刷される各データサンプルに対して 1 パルス）。

❼ Extl +10V/GND：SBC に搭載されている +5 から +10V へのスイッチングレギュレータの代わりに、これらのピンを使用して外部 +10V 電源でセンサーに電源を供給することができます。緑色で囲った R48 を必ず外してください。

アドバンスボード（オプション）

高機能通信基板

高機能通信基板（ACB）は、UAV や UUV を含む様々なモバイルプラットフォームに QTFM センサーを容易に組み込むために作られました。ACB は軽量設計で、すぐに使える機能を備えているため、データロギングとフュージョンを迅速に行うための実用的なソリューションを提供します。最新の ACB バージョン（ACB 2.0）は、QTFM Gen-1 および Gen-2 センサー（A および B のバリアント）の両方に対応します。

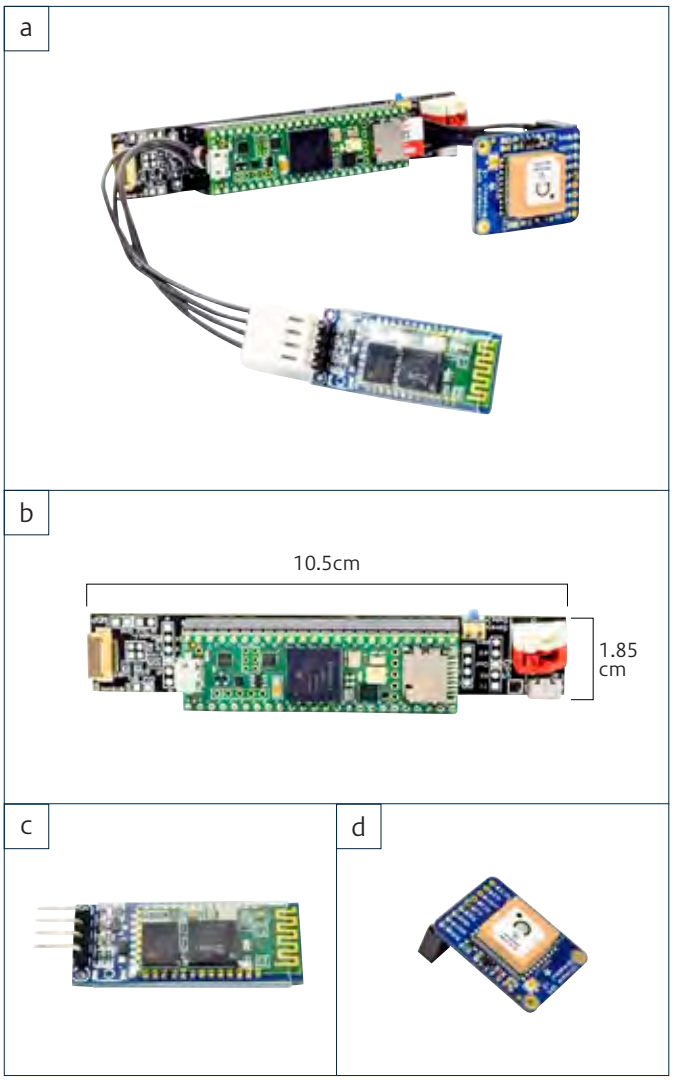
主な特長

ACB 2.0 は、内蔵データロガー、1PPS の GPS 受信機、ワイヤレス Bluetooth 接続、簡単にアクセスできる外部電源の入力を備えています。軽量（～ 23g）、コンパクト（1.85cm x 1.2cm x 10.8cm）、低消費電力（～ 1.5W）です。

- USB ケーブルで PC にデータを転送可能
- タイムスタンプの MDP（Mag Data Pulse）と 1-PPS にアクセス可能
- 外部バッテリー / 電源（+3.3 ～ +5.5V）への接続が容易
- USB 給電の外部バッテリーをホットスワップしてホールドオーバーが可能
- センサーアレイ用シンクイン / アウト
- CSV ファイル形式（標準、地理空間、フラット構成のいずれか）を開く

ファイルの保存

ファイルの保存は、ボタンを押すか、Bluetooth で電話機と無線コマンドを送信することで実行され非常に簡単です。一度保存したファイルは USB 経由でダウンロードでき、オープンソースの CSV フォーマットで保存されます。また、保存したファイルのインポート、ファイル形式の変換、見出しエラーの修正などができるフリーソフトのツールもご用意しています。



高機能通信基板 2.0：(a) ACB2、ロガー付き (b) Bluetooth 受信機、(c) GPS モジュール (d) ACB2、Bluetooth と GPS 付き

同梱物

- Teensy 4.1 ベースの内蔵データロガー（GPS と QTFM のデータを記録するようにあらかじめプログラムされています。）
- データ保存用 32GB SD カード
- GPS モジュール
- Bluetooth アダプター（PC、Android、iPhone 対応）

NANOXEED 株式会社ナノシード
〒182-0026 東京都調布市小島町 1-35-3 レジダンスオノ 501
受付時間 / 10:00 ～ 18:00（土日祝日を除く）
03-5953-8810 info@nanoxeed.co.jp https://nanoxeed.co.jp/