

TI Designs: TIDA-01465

静電容量式の霜/氷検出リファレンス・デザイン — 分解能 1mm 未満、温度ドリフト 0.25% 未満



概要

冷却器および蒸発器の着霜/着氷は、冷蔵庫やエアコン、冷凍庫など多くの家電製品において、システムの電力効率を大幅に低下させるおそれがあります。

家電製品の電力効率要件が厳しさを増す中、このセンサ・リファレンス・デザインは、不要な除霜サイクルを減らすことによって要件の達成を支援します。冷却器の筐体や金属表面の着氷量を検出して(分解能 1mm 未満)除霜サイクルの頻度を制御・決定し、必要なときにのみサイクルを開始するデザインです。

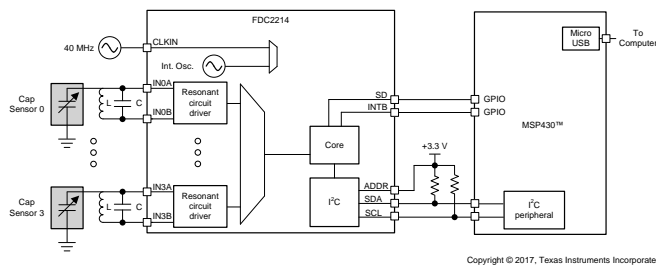
このデザインは、タイマや温度センサを用いる、従来のデフロスト・トリガ方式の代替となります。

リソース

TIDA-01465	デザイン・フォルダ
FDC2214	プロダクト・フォルダ
MSP430F5528	プロダクト・フォルダ
LP2985-N	プロダクト・フォルダ
TPD2E001	プロダクト・フォルダ



E2E エキスパートに質問

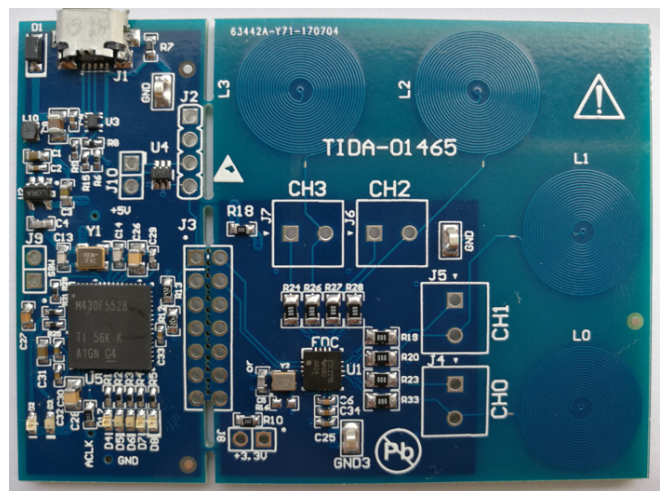


特長

- 高感度、高信頼性、低コストにより、あらゆる種類の冷凍冷蔵機器において汎用的に適用可能
- 最大 4 つのセンサ・チャンネルをサポート
- 冷凍冷蔵機器の気化コイル表面に蓄積した氷や霜の厚さを正確に検出
- 冷凍冷蔵機器の気化コイルの着氷/着霜を柔軟に制御
- 気化コイルの氷や霜を溶かさず除霜サイクルを最小限に抑えて、不要な除霜サイクルをなくし、消費電力を削減
- 物質の状態の物理的変化を検出可能
- 静電容量式センシング技術と革新的なナローバンド・ベースのアーキテクチャにより、ノイズや干渉の除去性能が高く、高速で高い分解能を実現

アプリケーション

- 冷蔵庫
- エアコン
- 冷凍庫





使用許可、知的財産、その他免責事項は、最終ページにあるIMPORTANT NOTICE (重要な注意事項)をご参照くださいますようお願いいたします。

1 システム概要

冷蔵庫、冷凍庫、エアコンといった最新型冷却家電機器では、蒸発器コイルに蓄積する氷や霜が常に問題になります。氷や霜の蓄積(着氷/着霜)により、冷却されるべき空気が、蒸発器内を循環する低温の冷媒液から分離されるため、冷却空間を希望温度に維持することが困難になります。また、冷却器への着氷につながる大気条件が生じると、熱交換が阻まれ、結果としてシステム全体の効率が低下します。こうした問題を解決するには、冷却器の熱交換器と連動する除霜システムが必要です。対処すべき課題は、除霜サイクルを起動するタイミングです。

過去に採用された方式では、いくつかの手法により、この問題を解決してきました。広く採用されている従来型の方式の一つでは、タイムクロックにより、事前に設定した時間間隔で圧縮機をオフにし、蒸発器コイルに隣接する加熱装置をオンにして氷や霜を溶かします。この手法の欠点は、周囲湿度および気温により、氷や霜が常に一定の割合で蓄積するとは限らないことであり、大半のクロック作動型除霜システムは、用心のために必要以上の頻度で除霜を実行し、着氷/着霜を一掃します。この定期的除霜は、要不要を問わず、氷や霜の蓄積量を考慮しないため非効率であり、電力を無駄にすることになります。もう一つの手法は、一般に氷や霜が溶けるのに十分とされる既定の時間、単に圧縮機を停止するというものです。ただし、圧縮機をオフにすると冷却空間温度の上昇を許すことになり、希望温度を維持するために圧縮機とそのモータが絶えず過剰に動作せざるを得なくなるため、この手法もまた非効率です。それ以外の手法では、温度検知装置を使用して冷媒の温度を測定し、既定の温度上昇が検出されると除霜サイクル信号を送信します。冷媒の温度のわずかな変化を検出するには極めて高い感度が要求されることから、この温度検知装置はたいてい不正確であり、蓄積した氷や霜の厚さに大きなばらつきが出てしまいます。

最も効果的な手法は、冷却器の着霜/着氷量を検知して、適切なタイミングで対策を開始することです。着氷に関するデータは、対策の起動をアシストする上で役立ちます。コントローラを霜検出センサおよび除霜システムと連動させることにより、熱交換管および伝熱フィンに着霜があることを示す信号に応じて、選択的に除霜システムを起動して蒸発器の除霜サイクルを開始できます。このリファレンス・デザインは、直接的な静電容量による着霜測定を実現して、除霜サイクル制御を改善するものです。テキサス・インスツルメンツの FDC2214 静電容量/デジタルコンバータにより、霜/氷の検知が可能になります。冷却器の管/フィン周りに静電容量センサを取り付け、センサと管/フィン間の静電容量を測定することによって、霜や氷の厚さを検知できます。

このリファレンス・デザインには次のような利点があります。

- システム電力効率の向上
- 不要な動作中断および除霜サイクルの回避
- 不快な可聴雑音の低減

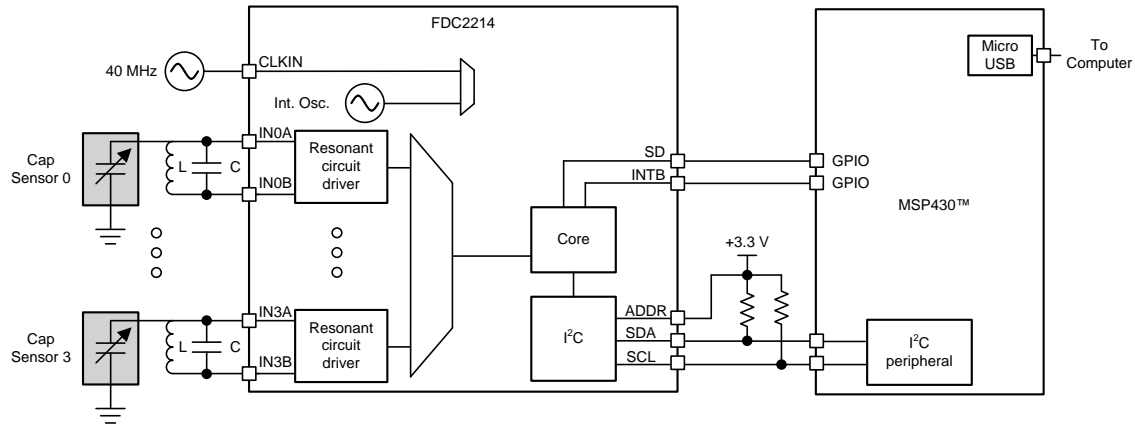
1.1 主なシステム仕様

表 1. 主なシステム仕様

パラメータ	仕様	詳細
センサの種類	銅メッシュセンサ	2.3.5
入力電圧	公称 5V (USB からの VBUS)	—
感度	感度分解能 0.5mm 未満	4.2.2
動作温度範囲	-40°C ~ 85°C	—
自己温度ドリフト	0.25% 未満	4.2.3
フォーム・ファクタ	70mmx51mm	—

2 システム概要

2.1 ブロック図



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

図 1. TIDA-01465 システムブロック図

2.2 使用製品

この霜/氷検出リファレンス・デザインの主要部品は FDC2214 であり、静電容量検知を採用して、霜や氷の厚さを検出します。外付けの MCU MSP430F5528 により、PC (パーソナルコンピュータ) の GUI (グラフィカルユーザーインターフェイス) を使用して、簡単に FDC2214 のパラメータを設定し、静電容量変化曲線を監視できます。このリファレンス・デザインに使用した製品について、選定理由となった特長も含めて、以下に詳述します。

- **FDC2214**: EMI (電磁干渉) 耐性に優れた 28 ビット静電容量/デジタルコンバータ
- **MSP430F5528**: 16 ビット超低消費電力 MCU (マイクロコントローラ)
- **LP2985-N**: マイクロパワー、150mA、低ノイズ超低ドロップアウトレギュレータ
- **TPD2E001**: 小容量、2 チャンネル、±15kV ESD (静電放電) 保護アレイ

使用製品の詳細については、www.ti.com に掲載されている個々の製品特性表を参照してください。

2.2.1 FDC2214

静電容量検知は、幅広い機器に適用できる、低消費電力、低コスト、高分解能の非接触型検知技術です。静電容量検知システムのセンサには、任意の金属や導体を使用できるため、低コストで柔軟性の高いシステム設計が可能になります。静電容量検知システムの感度を制限する主な問題は、センサのノイズ感受性です。

FDC2214 は、高分解能で EMI 耐性に優れた、高速のマルチチャネル静電容量/デジタルコンバータであり、静電容量検知の実装に適しています。革新的な狭帯域ベースのアーキテクチャ、L-C 共振器を採用しているため、ノイズや干渉の除去性能が高く、高速で高い分解能を実現します。従来のスイッチ式静電容量アーキテクチャとは異なり、狭帯域アーキテクチャにより、かつてない優れた EMI 耐性を実現し、ノイズフロアを大幅に低減できます。さらに、幅広い励起周波数をサポートしているため、システムを柔軟に設計できます。この革新的な EMI 耐性アーキテクチャにより、ノイズの多い環境でも性能を維持できます。

このアプローチを採用することで、L-C タンクの容量の変化を共振周波数の変化として観測できます。この原理により、FDC2214 は LC 共振器の発振周波数を測定する静電容量/デジタルコンバータ (FDC) として機能します。このデバイスは、周波数に比例するデジタル値を出力します。この周波数測定値は、等価な容量値に変換できます。

特長:

- EMI 耐性アーキテクチャ
- 最大入力静電容量: 250nF (任意の金属や導体の 10kHz 検知システムで、1mH インダクタ使用可)
- センサ励起周波数: 10kHz ~ 10MHz
- チャネル数: 4
- 分解能: 最大 28 ビット
- 電源電圧: 2.7V ~ 3.6V
- 消費電力: 動作時 2.1mA
- 低消費電力スリープモード: 35µA
- インターフェイス: I²C
- 温度範囲: -40°C ~ +125°C

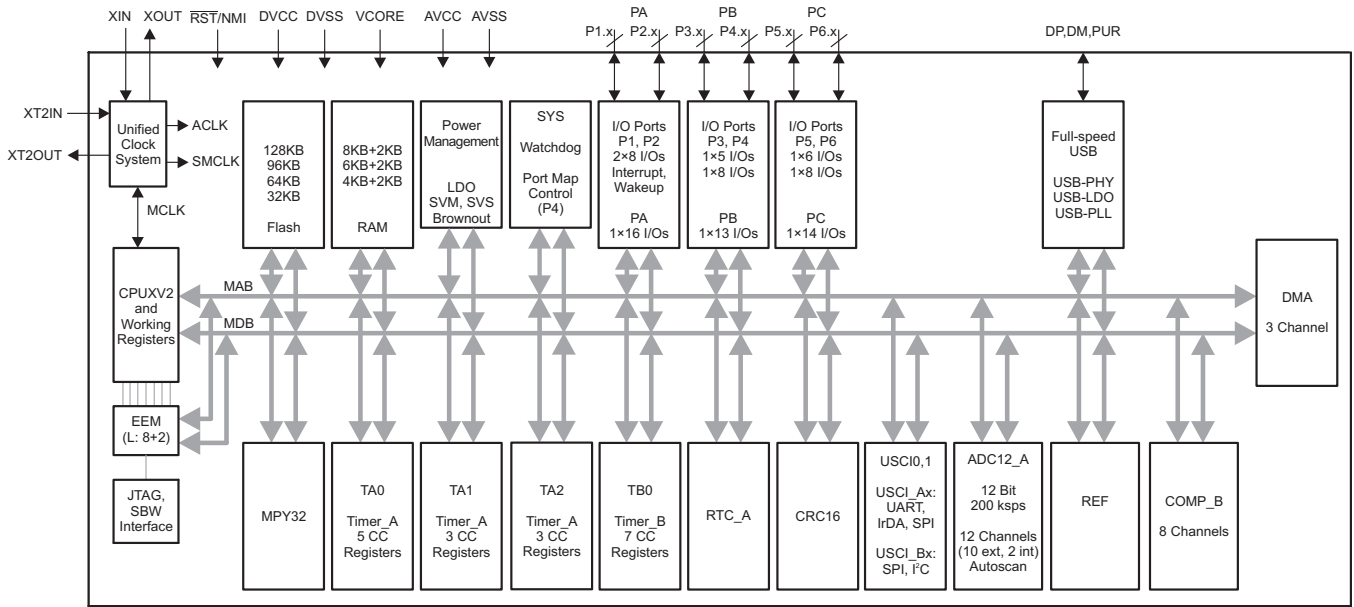
2.2.2 MSP430F5528

TI MSP430™ファミリの超低消費電力 MCU は、さまざまな用途に向けて多様なペリフェラルを搭載した、複数の製品で構成されています。低消費電力モードを搭載したアーキテクチャは、携帯型測定機器で長いバッテリー駆動時間を実現するように最適化されています。この MCU には強力な 16 ビット RISC (縮小命令セットコンピューティング) CPU (中央処理装置)、16 ビットレジスタ、定数発生器が搭載されていることから、コード効率を最大限に高めることが可能です。デジタル制御発振器 (DCO) により、低消費電力モードから 3.5µs (標準値) で起動できます。

MSP430F5528 には、USB 2.0 対応の USB と PHY、4 つの 16 ビットタイマ、高性能 12 ビット ADC (A/D コンバータ)、2 つの USCI (Universal Serial Communication Interface)、ハードウェアマルチプライヤ、DMA (ダイレクトメモリアクセス)、アラーム機能付き RTC (リアルタイムクロック) モジュール、47 の I/O (入出力) ピンが搭載されています。

代表的なアプリケーションには、アナログ/デジタルセンサシステムやデータロガーをはじめ、さまざまな USB ホストへの接続を必要とするその他の機器があります。

図 2 に MSP430F5528 の機能ブロック図を示します。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

図 2. MSP430F5528 の機能ブロック図

2.2.3 LP2985-N

LP2985-N 低ノイズリニア (LDO)レギュレータは、最大 150mA の出力電流を供給し、必要とする入力から出力までのドロップアウト電圧はわずか 300mV です。最適化された VIP (Vertically-integrated PNP) プロセスの採用により、あらゆる低消費電力機器で比類ない性能を提供します。LP2985-N は公差 1% の高精度な出力電圧を供給し、静止電流は 1mA の負荷でわずか 75µA、150mA の負荷で 850µA となっています。10nF のバイパス容量を追加することにより、30kHz 帯域で出力ノイズを 30µV_{RMS} まで低減できます。

LP2985-N は、等価直列抵抗 (ESR) がわずか 5mΩ のセラミック出力コンデンサを使用できるように設計されています。LP2985-N は 2.5V ~ 6.1V の固定出力電圧を供給できます。

図 3 に LP2985-N の機能ブロック図を示します。

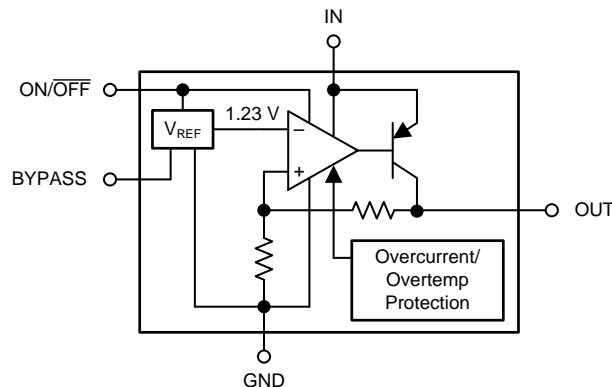


図 3. LP2985-N の機能ブロック図

2.2.4 TPD2E001

TPD2E001 は、ESD 保護ダイオードアレイをベースとする 2 チャネルの TVS (過渡電圧サプレッサ) です。IEC 61000-4-2 レベル 4 国際規格で規定されている最大レベルの ESD 耐性を備えています。TI はセンサの各チャンネルに 1 つずつ TVS を配置することを推奨しています。

図 4 に TPD2E001 の標準的な USB 回路図を示します。

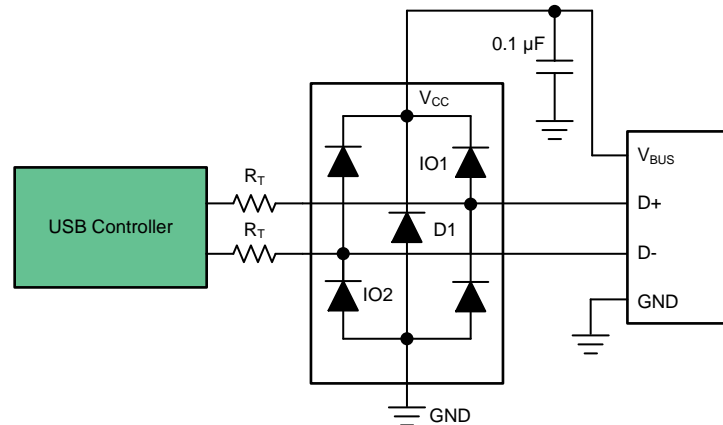


図 4. TPD2E001 の標準的 USB 回路図

2.3 システム設計理論

このリファレンス・デザインは、TI の静電容量検知技術を採用して、冷却器表面に蓄積した霜や氷の厚さを検出する方法を実現するものです。FDC2214 は、銅メッシュセンサと冷却器金属表面の電極間に形成される静電容量を測定します。空気と霜/氷の間で比誘電率が変化することから、霜や氷の厚さに基づいて静電容量は変化します。

2.3.1 静電容量測定の基本

静電容量とは、コンデンサの電荷を蓄える能力をいいます。平行板コンデンサなどの一般的な形態の場合、静電容量は $C = Q/V$ で計算されます。ここで、 C は所定の電圧 V で蓄えられる電荷 Q に関する静電容量です。平行板コンデンサの静電容量 (測定単位:ファラド) (図 5を参照) は、2 枚の導体板で構成され、次の式 1 で計算されます。

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times A}{d} \quad (1)$$

ここで、

- A は 2 枚の板の面積です (単位:メートル)。
- ϵ_r は 2 枚の板に挟まれた物質の比誘電率です。
- ϵ_0 は真空の誘電率です ($8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)。
- d は 2 枚の板の間隔です (単位:メートル)。

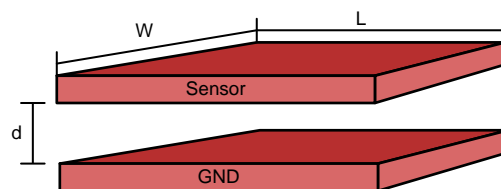


図 5. 平行板コンデンサ

帯電した平行板コンデンサの板表面には、逆符号の電荷が均一に分布しています。電界線は、電位の高い帯電板から電位の低い帯電板に向きます。平行板の式では、動作のモデル化が複雑であるためフリンジング効果を見落していますが、この式は、2枚の板の間隔(d)が板の他の寸法に比べて小さく、コンデンサの電界がその面積の大半で均一になっている場合には適切な概算手法となります。フリンジング効果は板のエッジ付近で、用途により発生し、システムによる測定の精度に影響を与えます。電界強度は等電位線の密度に比例するため、フリンジ領域の電界線の密度は板直下の密度より低くなります。この特性からフリンジ領域の電界強度は弱く、総静電容量の測定値への影響もはるかに小さいものとなります。図6に平行板コンデンサの電界線経路を示します。

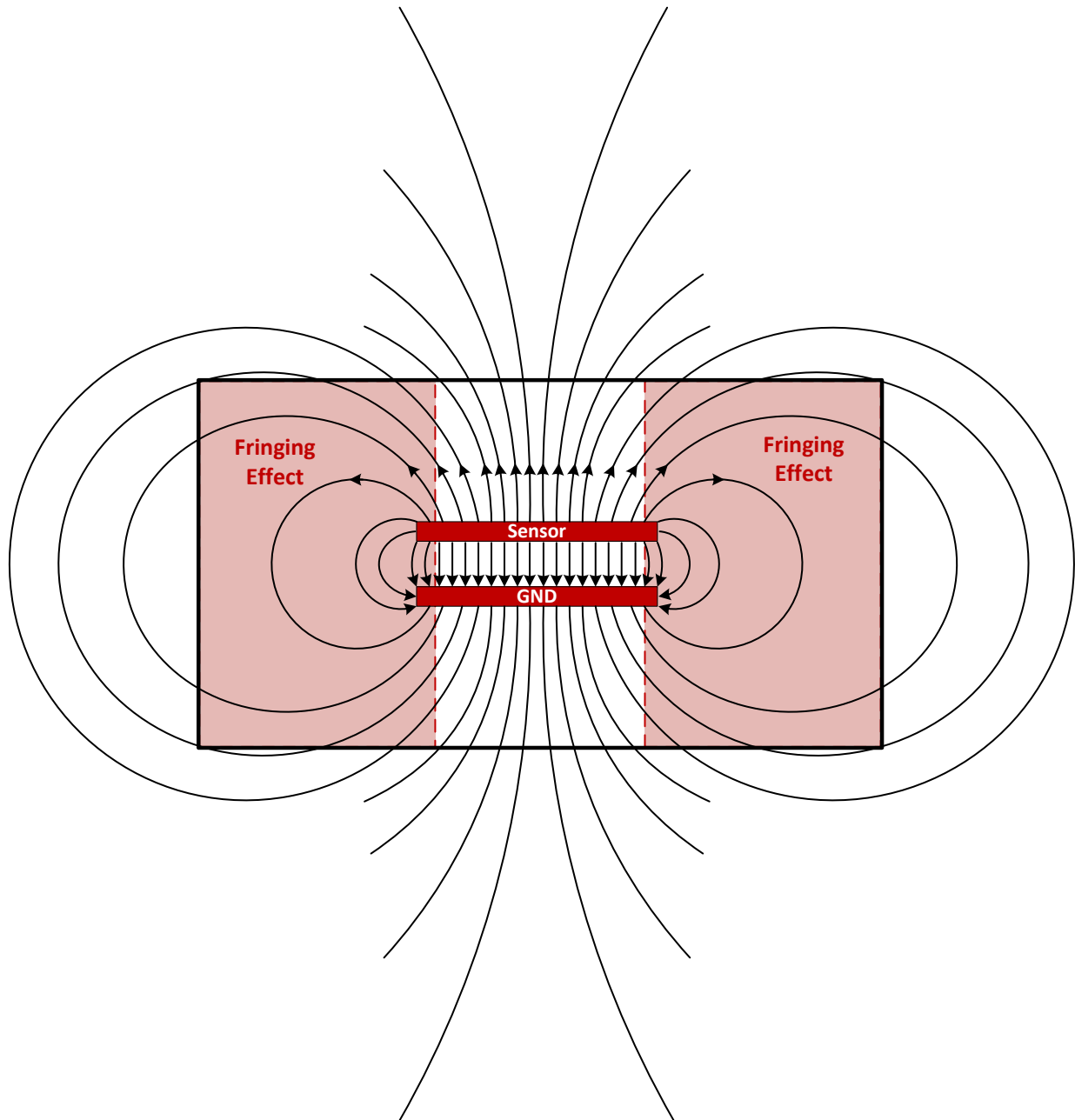


図 6. 平行板コンデンサの電界

2.3.2 静電容量検知

静電容量検知は容量結合に基づく技術です。静電容量検知により、液面測定、材料組成、機械式ボタン、HMI (ヒューマンマシンインターフェイス) といった用途で、より信頼性の高いソリューションが実現します。基本的な静電容量センサは、金属や導体であり、導電性があったり、比誘電率が空気とは異なるものを検出します。図 7 に静電容量検知の 3 つの基本的な実装として、近接検出/ジェスチャ認識、液面検知、物質分析を示します。

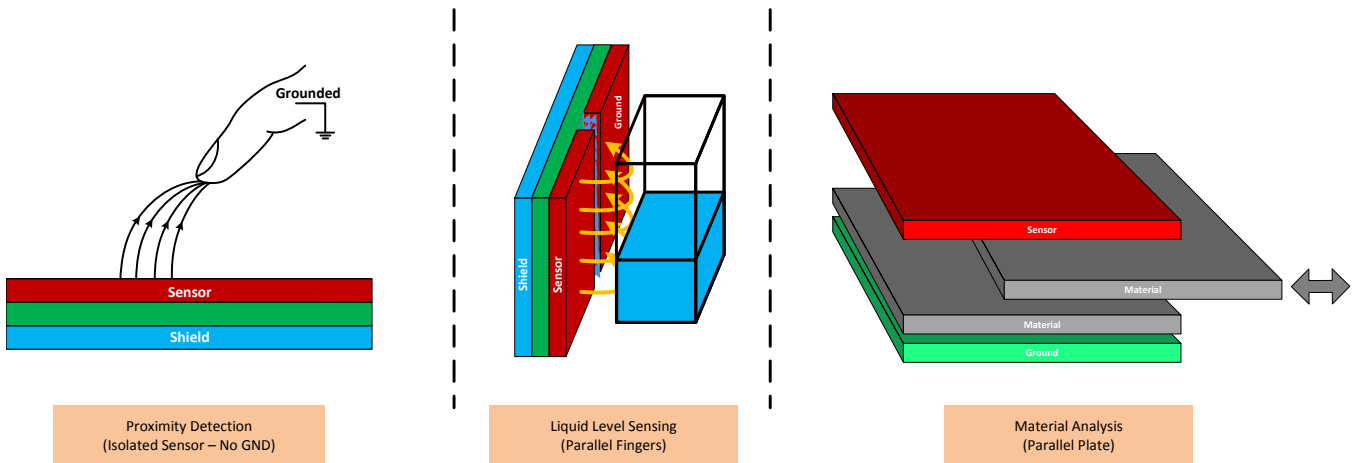


図 7. 静電容量検知の基本的実装

パラメータの 1 つが変化し、残りは一定に維持されることから、静電容量を検出して、さまざまな対象を検知できます。物質分析では、物質間の比誘電率の違いに応じて、2 枚の板の間の静電容量が変化します。用紙束高さ検知では、2 枚の板の間に挿入される紙の枚数が増えるにつれて静電容量が増大します。設計者は、空気層と用紙層の差(比誘電率の変化と既知の用紙高さおよび空気層による)から、静電容量を計算できます。表 2 にいくつかの物質の比誘導率を示します。

用紙束高さ検知とまったく同様に、図 8 に示すとおり、冷却器表面に霜や氷が蓄積することによって、2 枚の平行板(一方は冷却器の金属表面、もう一方は専用に設計されたセンサ)の間の静電容量は、等価比誘電率の変動に伴って変化します。導電物質からなる適切に設計されたセンサを冷却器表面に固定すると、 d 、 ϵ_0 、 A のパラメータは一定のままです。したがって静電容量は ϵ_r の等価関数となります。これがこの霜/氷検出リファレンス・デザインの基本原理です。

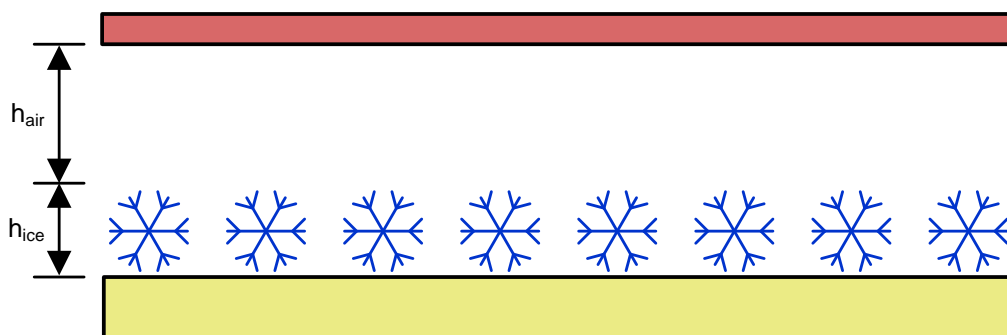


図 8. 静電容量に基づく霜/氷検出モデル

表 2 は、氷の比誘電率が空気の 3 倍に相当し、水の比誘電率はそれよりさらに高いことを示しています。氷と水が平行板コンデンサの近くに配置されると、静電容量は増大します。

表 2. 物質の比誘電率

物質	比誘電率 (ϵ_r)	備考
空気	1	—
水	80	20°C
ガラス	7.6 ~ 8.0	—
紙	2.3	—
氷	3.2	—

2.3.3 静電容量検知回路設計

従来のスイッチ式静電容量アーキテクチャとは異なり、FDC2214 は LC 共振器 (LC タンク) をセンサとして採用しています。狭帯域アーキテクチャにより、かつてない優れた EMI 耐性を実現し、他の静電容量検知に比べてノイズフロアを大幅に低減できます。

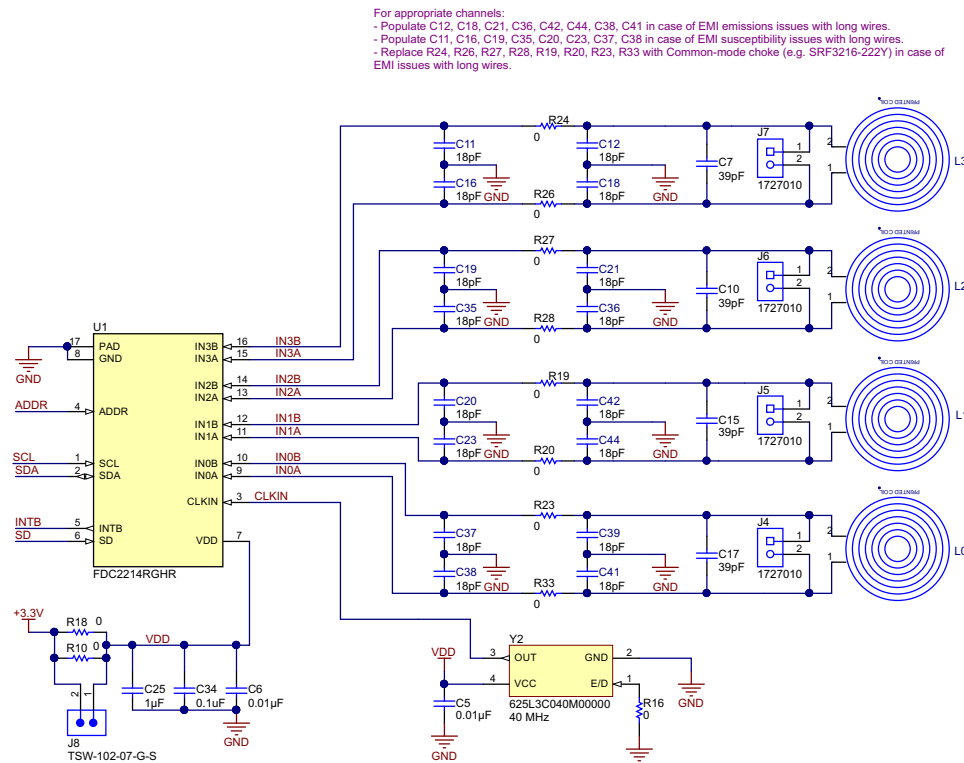
このアプローチを採用することで、LC タンクの容量の変化を共振周波数の変化として観測できます。この原理により、FDC2214 は LC 共振器の発振周波数を測定する静電容量/デジタルコンバータとして機能します。周波数と比例するデジタル値を出力し、この周波数測定値を等価容量値に変換できます。

図 9 に前述の LC タンクを内蔵する静電容量検出回路図を示します。式 2 に示すように、L と C の値の組み合わせによって LC 共振周波数が決まります。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

実際の用途では、システムによってばらつきが出ます。その主な原因は、部品の公差や環境ドリフトです。コンデンサおよびコイルのインダクタンスは、システム間のばらつきを生む大きな要因となります。TI は公差 1% の NP0/COG セラミックコンデンサなど、高品質のコンデンサを推奨します。このリファレンス・デザインは、よく使われている SMD (表面実装部品) 型のインダクタではなく、温度安定性に優れた 2 層 PCB (プリント基板) コイルを採用しています。コンデンサはセンサコイルのできるだけ近くに配置して、PCB 配線の寄生インダクタンスを低減します。

L および C の設計値については、FDC2214 の要件を満たす必要があります (『FDC2x1xEMI 耐性、28 ビット、12 ビット、キャパシタンス - デジタル・コンバータ、近接およびレベル・センシング・アプリケーション用』を参照[1])、LC 共振器の発振周波数の範囲は 10kHz ~ 10MHz と規定されています。このリファレンス・デザインの PCB インダクタは、各コイルの直径が 13.9mm、層当たり巻数は 19 となっています。公称インダクタンスは 8.6μH です。各チャンネルの PCB にはんだ付けするタンクコンデンサは、39pF、1% セラミック NP0/COG SMD 部品です。静電容量検知回路に追加するピン、配線、ワイヤの容量も考慮してください。FDC2214 による変換の結果を確認して、寄生容量を計算します。これについては、4.2.1 のテスト結果で述べています。このリファレンス・デザインの基板およびワイヤの寄生容量は約 14.6pF となります。タンクコンデンサ (39pF)、寄生容量 (14.6pF)、検知容量を含めたこのリファレンス・デザインの総容量は約 70.7pF となり、これを GUI で観測します。これらの値により、タンクは通常、10MHz の動作限界値を下回る、約 6.5MHz で振動します。4.1.2 に GUI パラメータ設定で使用する主要なパラメータを示します。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

図 9. 静電容量検出回路図

静電容量検出回路 (C7、C10、C15、C17) の容量値を引き上げると、静的ベースライン容量は増大します。この値が大きくなると、ノイズ/ベースライン基準比が改善され、システムの外乱耐性は向上しますが、その一方で検出回路の感度は低下します。このため設計時には、さまざまな用途条件に応じて、ベースライン静電容量を選定する必要があります。

センササイズ、検知ターゲットの距離、オーバーレイ素材によって、検知静電容量は変わってきます。通常、センササイズは検知静電容量に直接関係します。サイズが大きいほど感度は高くなります。センサは、冷却器の機械構造に基づいて専用に設計する必要があります。

したがって、設計課題の一つは、検知静電容量とシステムの静的静電容量の比です。システムの静的静電容量を最小化することが最もよく検討される方法の一つですが、電子部品、ワイヤ、ときには最終機器のフレームの特性上、その実現は困難です。

FDC2214 はこの課題を見事に解決し、28 ビットの高分解能の変換結果により、検知静電容量のわずかな変化についても正確な測定値を提供します。

FDC2214 の変換値は、式 3 を用いて静電容量に変換できます。

$$C_{\text{SENSOR}} = \frac{1}{L \times (2\pi \times f_{\text{SENSOR}})^2} - C \tag{3}$$

ここで、

- C は平行センサ静電容量 (LC タンクの静電容量) と寄生容量の和です。

f_{SENSOR} の値は式 4 を用いて計算します。

$$f_{\text{SENSOR}} = \frac{\text{CH_FIN_SEL} \times f_{\text{REF}} \times \text{Count}}{2^{28}} \quad (4)$$

ここで、

- CH_FIN_SEL は FDC2214 レジスタの「sensor frequency select」ビット値で、このリファレンス・デザインでは 1 になります。
- f_{REF} はチャンネルの基準周波数で、このリファレンス・デザインでは 40MHz となります。シングルモードを選択した場合、最大値は 35MHz です。

前述の式 3 および式 4 を用いて、変換結果を静電容量に変換します。

上記図 9 の回路図の一部の部品はオプションであり、過酷な環境条件下で回路が機能する際のノイズフィルタ処理機能を強化するために使用します(詳細については『FDC2114/FDC2214 EVM ユーザーガイド』を参照[2])。また TI は、ESD の影響を受けやすい用途では、センサ接続ポートに ESD 保護部品を採用することも推奨しています。

2.3.4 静電容量センサの方式

静電容量センサには、用途に応じて一般的ないくつかの方式があります。センサ方式は次の事項に依存します。

- センサ - ターゲット間の距離
- ターゲットの比誘電率
- 希望感度

基本的な方式には次のものがあります。

- 平行板
- 平行フィンガ
- 人物認識用単一センサ

2.3.4.1 平行板

平行板方式は、前述した式 1 の平行板コンデンサの式のとおり動作します。2 枚の板に挟まれた電界の密度が高いため、感度も高くなります。この方式の用途例は、図 10 に示す物質分析や用紙束高さ検知です。物質分析では、物質間の比誘電率の差に応じて、2 枚の板の間で静電容量が変化します。FDC2214 は高分解能であるため、誘電体のごくわずかな変化も検出できる感度範囲を実現します。用紙束高さ検知では、2 枚の板の間に挿入される紙の枚数が増えるにつれて静電容量が増大します。空気層と用紙層の差(比誘電率の変化と既知の用紙高さおよび空気層による)から、静電容量を計算できます。この霜/氷検出リファレンス・デザインでは、この方式を採用し、物質分析の基本原則も応用しています。

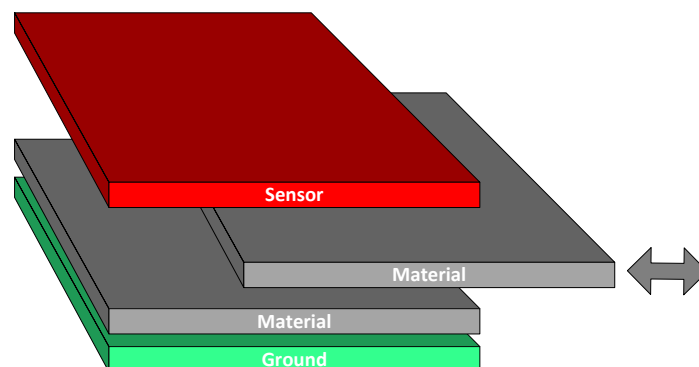


図 10. 物質分析の平行板方式

2.3.4.2 平行フィンガ

平行フィンガ (GND センサ) 方式は、フリンジング容量の原理に基づいて動作します。センサの z 軸 (図 11 を参照) の感度が高いため、この方式は液面検知機に実装できます。電界線は、センサと GND の板に挟まれたエッジ付近でより顕著になります。静電容量の計算は単純な平行板方式のように簡単ではないものの、センサの感度はセンサのサイズが大きいほど (非線形に) 高くなります。主センサおよび GND の電極の後部にあるシールドは、ターゲットへの指向性を与えます。

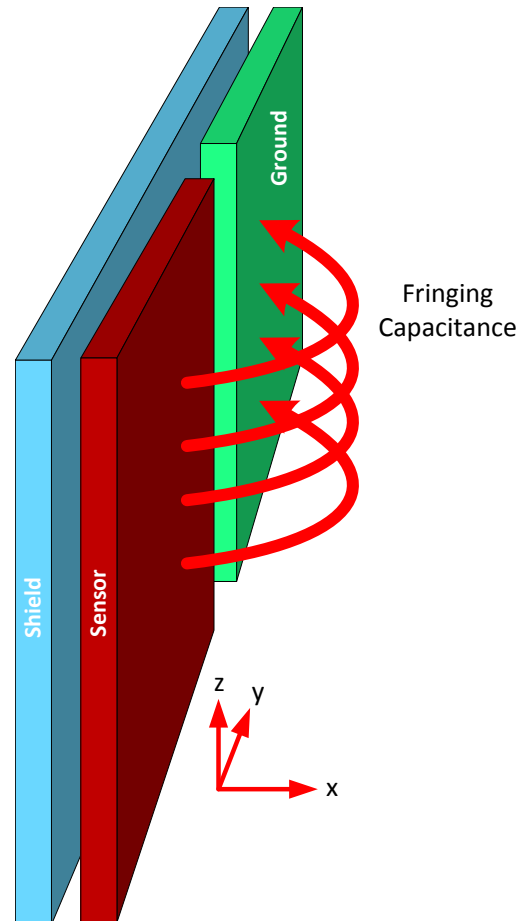


図 11. 平行フィンガ (GND センサ) 方式

平行フィンガでは、いくつかの異なる構成を設計できます。図 12 に GND センサの構成を示します。図 12 に示すように、複数のセンサおよび GND の電極を交互に配置し、GND またはセンサを中央にして対称に配置できます。中央の GND は電極の幅に沿って広い指向性を確立する必要があり、これにより極めて広い応答が得られます。中央のセンサ電極は、電極の幅に沿って高い指向性を確立する必要があり、これにより極めて高感度の応答が得られます。図 13 に、この 2 つのバリエーションからなり、広く高い指向性を実現する上で非常に効果的な櫛歯構成を示します。櫛歯構成は通常、雨センサなど、広大な検知領域と高い感度または分解能が要求される用途に適しています。

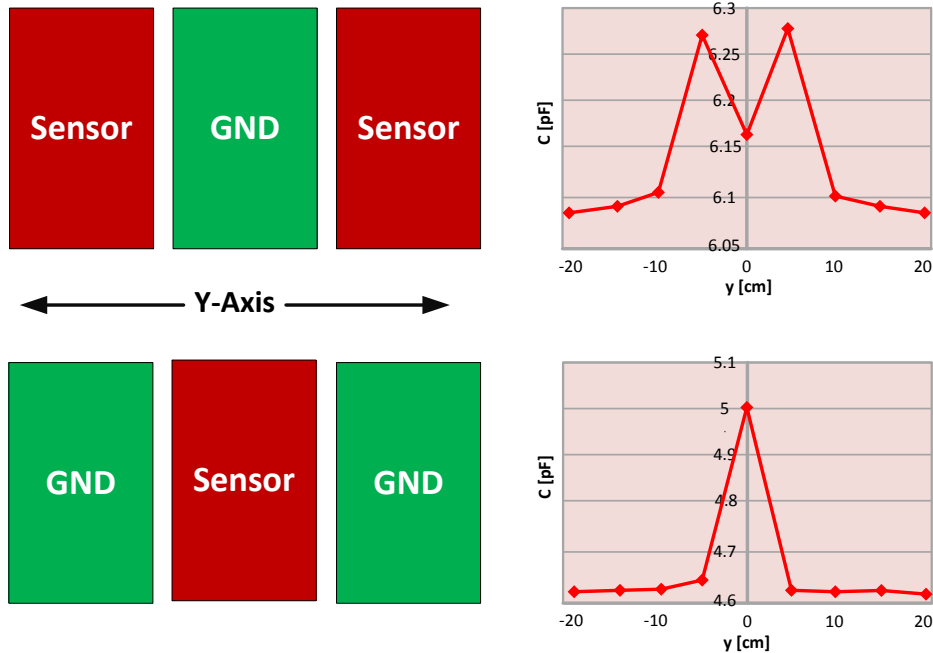


図 12. 中央の GND、中央のセンサに対して対称

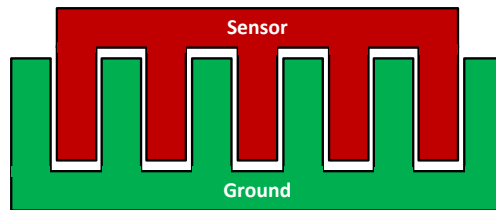


図 13. 櫛歯センサ設計

2.3.4.3 人物認識用単一センサ

人物認識用単一センサ設計は、人の手や指が GND 電極にとって代わる以外は、平行フィンガ方式と同じフリンジ容量の原理を採用しています。人体は接地しているため、手がセンサに近づくにつれて、フリンジング電界線はセンサから手に逸れていきます。センサと GND (手) の電極の間隔が唯一の変化するパラメータであることから、この手法の動作は平行板の式と同様になります。フリンジング効果により、手がセンサに近づくにつれて静電容量は非線形に増大します。図 14 に示すように、センサ電極の下にあるシールド電極によって、EMI や寄生容量による効果を低減できます。

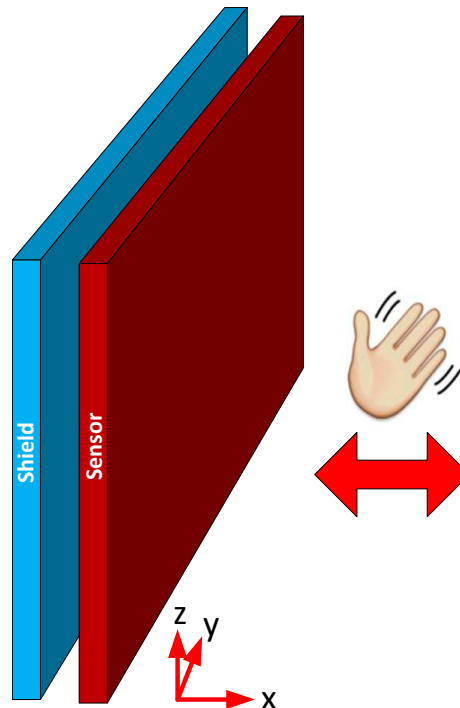


図 14. 人物認識用単一センサ方式

2.3.5 センサ設計

霜および氷の厚さを検出するセンサの設計に際しては、2.3.4.1、2.3.4.2、2.3.4.3の記述に基づき平行板方式を選定します。

前述の式 1 に示すように、センサ容量はコンデンサの板の面積と直接的な相関関係にあります。センサの面積が増すと、感度も高くなります。このリファレンス・デザインでは、冷却器のターゲット金属表面をコンデンサの板の 1 枚とします。もう一方のターゲット金属表面は、冷却器の機械構造に基づいて専用に設計されたセンサです。

図 15 に 2 種類の標準的な冷蔵庫/冷凍庫用冷却器を示します。

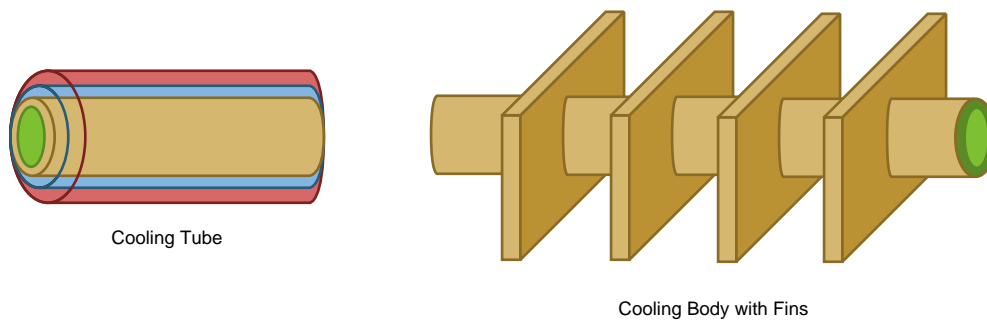


図 15. 冷蔵庫/冷凍庫の冷却器

図 16 にこれらの冷却器の構造に基づく 2 種類のセンサ設計を示します。

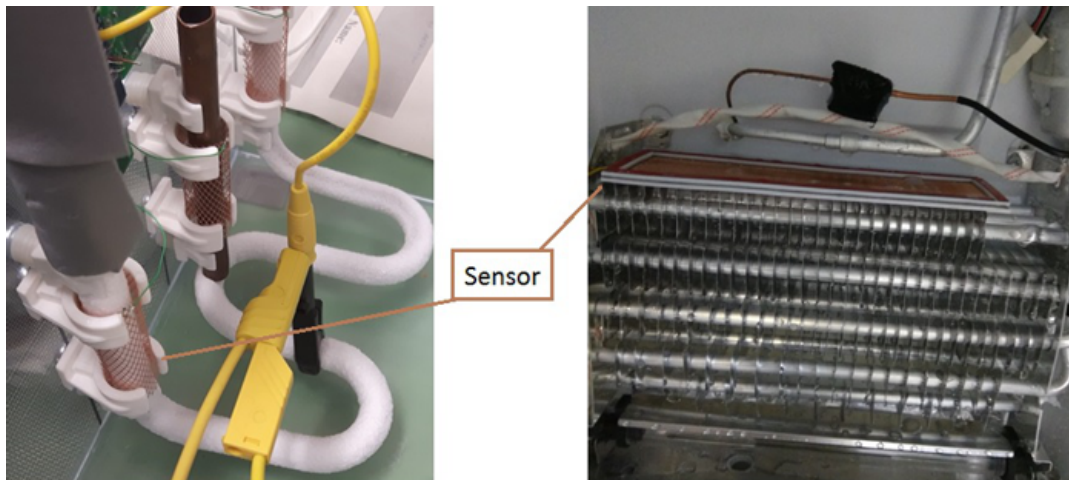


図 16. 静電容量センサ

1 つ目のセンサ設計は、円筒型冷却管に適合し、その表面を覆うように装着します。2 つ目のセンサ設計は、エッジ面のフラットなヒートシンクフィンが無数に並ぶ冷却器専用です。素材については、銅メッシュを選定します。次の 2.3.6 で、センサ設計における重要な検討事項について述べます。

図 17 に、原理上予想される静電容量変化曲線の例を示します。第 1 段階では、冷却器の乾いた表面に霜や氷はなく、静電容量は一定値を維持しています。第 2 段階に入るや否や、冷蔵庫やエアコンの圧縮機が動作を開始し、冷却器表面に霜や氷が徐々に蓄積していきます。空気から氷への比誘電率の変化により(表 2 を参照)、霜や氷の厚さに基づいて静電容量が増大します。希望の厚さが検出された時点で、除霜サイクルが起動します。第 3 段階で示すように、氷 ($\epsilon_r = 3.2$) が水 ($\epsilon_r = 80$) に変わると静電容量は急激に変化し、その後、冷却器から水分が消えると元の値に戻ります。

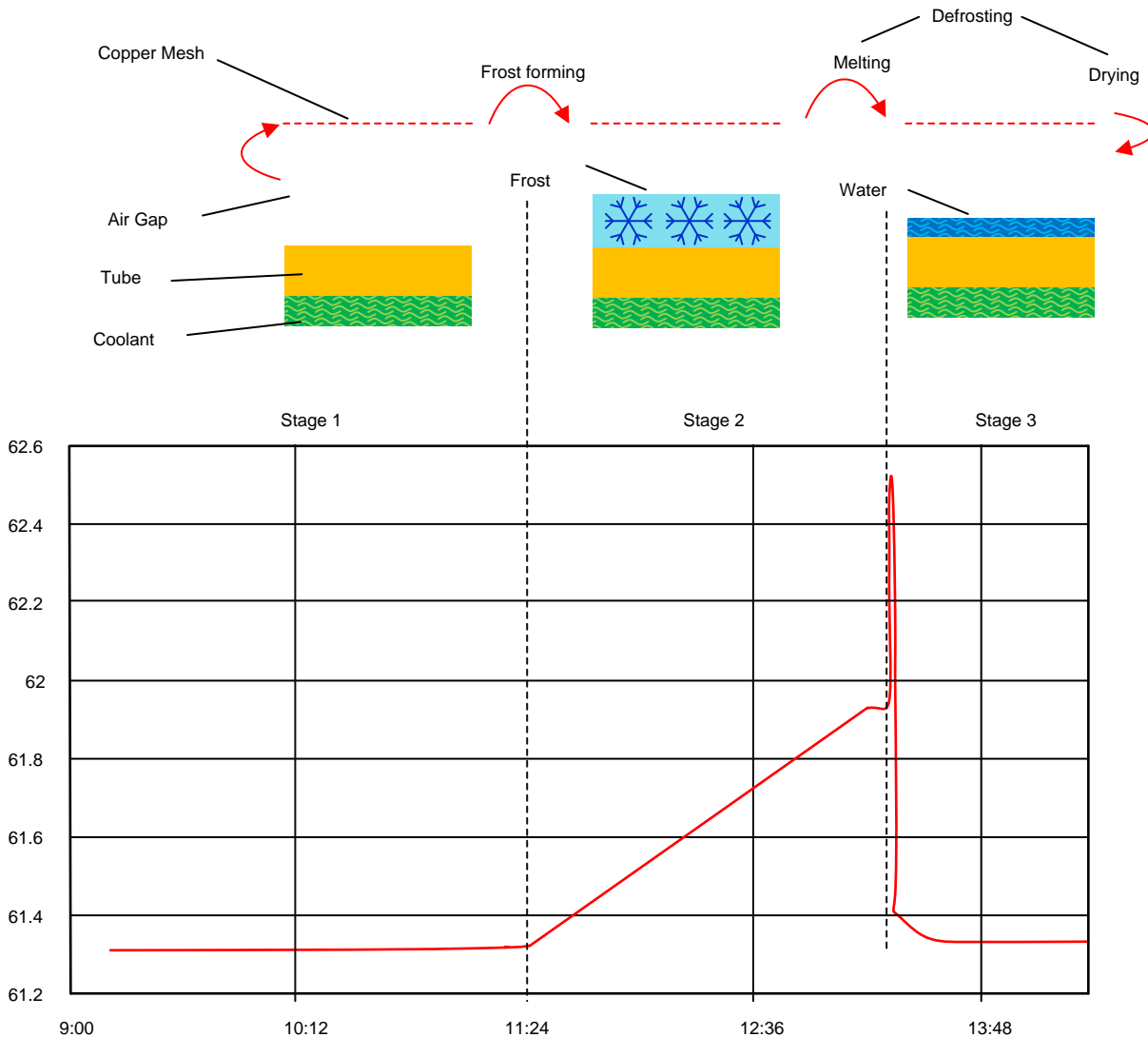


図 17. 単一サイクルでの静電容量の変化

2.3.6 センサ設計における検討事項

センサ電極と冷却器の間隔によって、センサ容量 C_{SENSOR} が形成されます。センサ部を設計する際は、センサ電極のサイズ、電極間の結合、冷却器を考慮する必要があります。以下の指針に従って、センサシステムの性能を最大限に引き出してください。

1. $C_{\text{SENSOR}}/C_{\text{PARASITIC}}$ 比を最大限にします。図 18 に示すように、
 - A. センサ面積 A_{SENSOR} の冷却器 - センサ電極間距離 d_{SENSOR} に対する比率を最大限にして、 C_{SENSOR} を増やします。
 - B. d_{SENSOR} は予想される d_{FROSTMAX} (霜や氷の厚さの最大値) に近い値に制限して、マージンをできるだけ小さく抑えます。
 - C. 寄生容量の変化またはドリフトを最小限に抑えます。
 1. 位置が変わる物体の層を最大限にとります。
 2. 信号完全性を確保したり、近接事象を遮断するために必要とされる場合を除き、センサ接続には推奨されるシールドなしの短距離ケーブルを使用します。

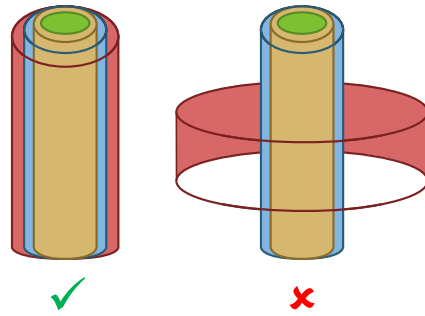


図 18. センサの最適化

2. 適切な C_{SENSOR} 値を目標にします。このため、
 1. 合理的な静電容量を目標にして、 $8.6\mu\text{H}$ の PCB コイルで 8MHz 未満という最適な共振周波数を達成します。
 2. 着氷によるセンサ容量の変化に対し、(FDC 入力容量としての) 寄生容量分の変化は無視できるほど小さくなるようにします。
TI は安定した性能を得るために次の設定を推奨します。

$$\Delta C_{\text{SENSOR}} > 0.5 \text{ pF} \Leftrightarrow C_{\text{sensor}} > 5 \text{ pF} \quad (5)$$

$$C_{\text{total}} = C_{\text{sensor}} + C_{\text{parasitic}} + C_{\text{tune}} > 60 \text{ pF} \quad (6)$$

注: FDC 内蔵フィルタ周波数は、必ず最大発振周波数を上回るように調整してください。

3. 自由な空気の流れ、等価着氷、100% の冷却性能を確保します。
センサ電極設計では、スムーズな空気の流れを確保するための配慮が推奨されます(図 19を参照)。スムーズな空気の流れにより、冷却器への等価着氷が促され、検知領域の静電容量は大きく変化できます。TI はエアフローにメッシュ電極を使用することを強く推奨します。あるいは、自由な空気の流れに干渉しない限り、機器筐体のプラスチック壁に板または箔を取り付けることもできます。

solid electrode impedes airflow

grid electrode free airflow

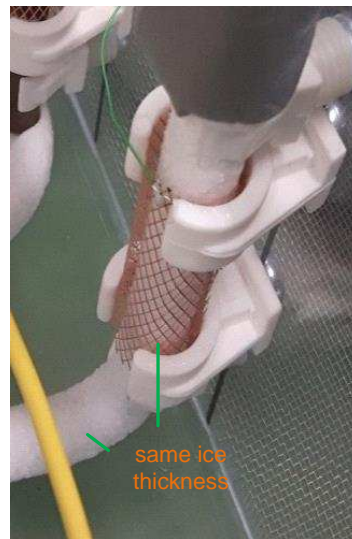
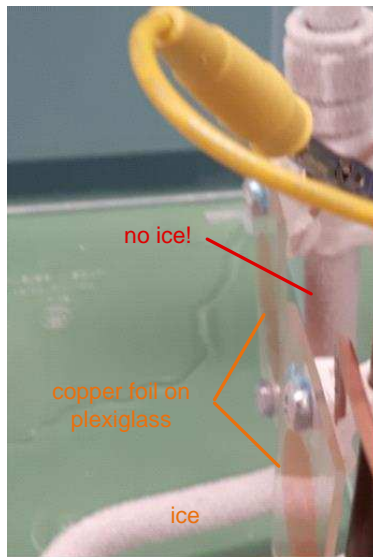


図 19. 異なる着氷

4. センサ周りの結露を最小限に抑えます。

検知領域に水分があると、静電容量が著しく増大します。したがって、この領域に水が蓄積しないようにすることが重要です。水は電極、その固定具、冷却器の管やフィンの表面張力により、取り込まれる可能性があります。垂直配向という手段で水の蓄積を回避し、重力の経路を塞がずに、センサ電極の水膜や水滴の脱出経路を提供して、冷却器に風を送り込みます(図 20を参照)。

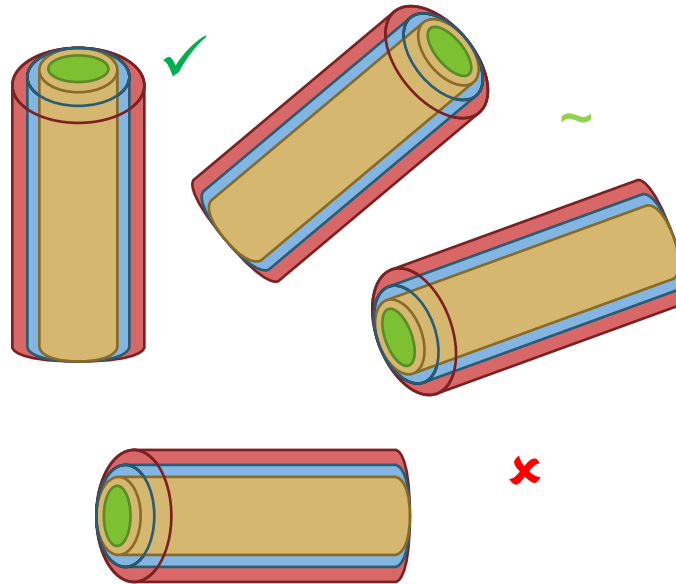


図 20. さまざまな配向

5. センサと共振回路の間は低インピーダンス接続とします。

共振周波数と静電容量測定値は、共振回路の抵抗と適切な減衰にある程度依存します。理想的な減衰特性と優れた性能を実現するには、定抵抗が適しています。TI は、接触不良メッシュの不明確な接触抵抗を回避するため、1 枚の銅板または金属板からセンサ電極を製造することを強く推奨します。スタンピングやストレッチングより、無視できるほど小さい通気抵抗と低いオーム抵抗を確保できます。

6. 一定の形状としっかりした固定具を確保します。
7. 腐食を回避します。

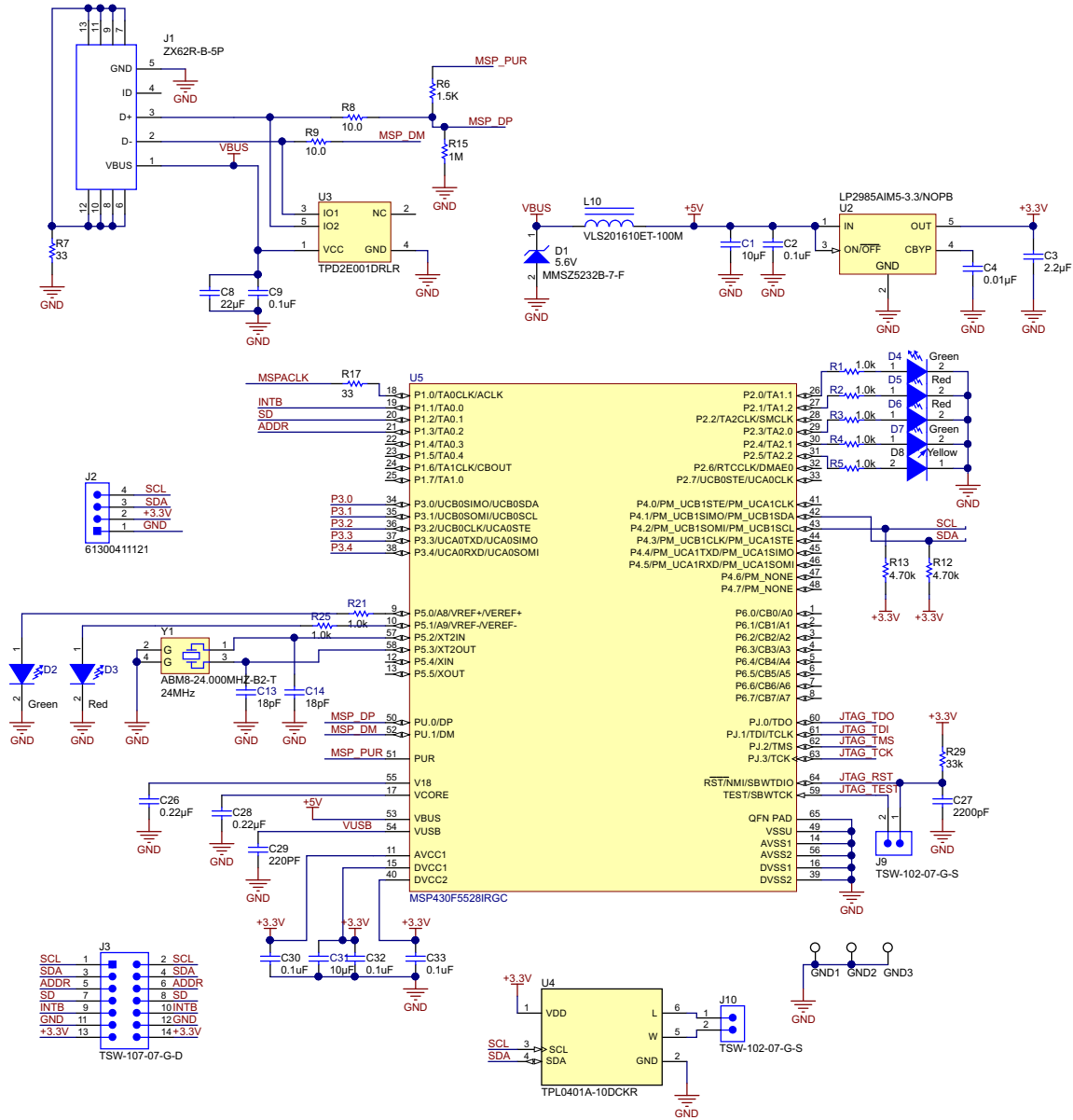
TI は、腐食を防ぐためにセンサ電極を被覆することを推奨します。

8. センサを較正します。

検知システムの初期誤差は、機械公差、コイルインダクタンス公差、コンデンサ公差、周辺金属などによって生じます。これらの初期公差に起因する検知誤差は、較正により大幅に低減できます。一般に、較正はシステムを使用する前に行います。較正プロセスによりデータが生成され、システムに恒久的に保存されます。使用中に、データ処理アルゴリズムが較正データを使用して検知誤差をなくします。

2.3.7 着脱可能なマイクロコントローラ基板

FDC2214 の出力では、 I^2C インターフェイスを使用してデバイス構成をサポートし、デジタル化した周波数値をホストプロセッサに送信できます。このリファレンス・デザインは、カスタム設計した補助基板 (図 21 を参照) を使用してホストコンピュータと通信し、MSP430™MCU により制御されます。PCB にミシン目が入っているため補助基板を分離でき、必要であれば別の MCU を検知基板に接続できます。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

図 21. 補助制御基板の回路図

3 ハードウェアの概要

本節では、ハードウェアの概要とインターフェイスコネクタ定義の詳細について述べます。

3.1 ハードウェアの概要

図 22 に TIDA-01465 リファレンス・デザインの PCB 上面/底面画像を示します。基板は、左右に 1 つずつ計 2 つの部品からなります。左側は補助コントローラ基板で、GUI を介してユーザーに静電容量変化曲線を示します。この補助コントローラは簡単に取り外すことができ、検知基板を個々のシステムに接続できます。右側は静電容量検知で、センサに接続する必要があります。

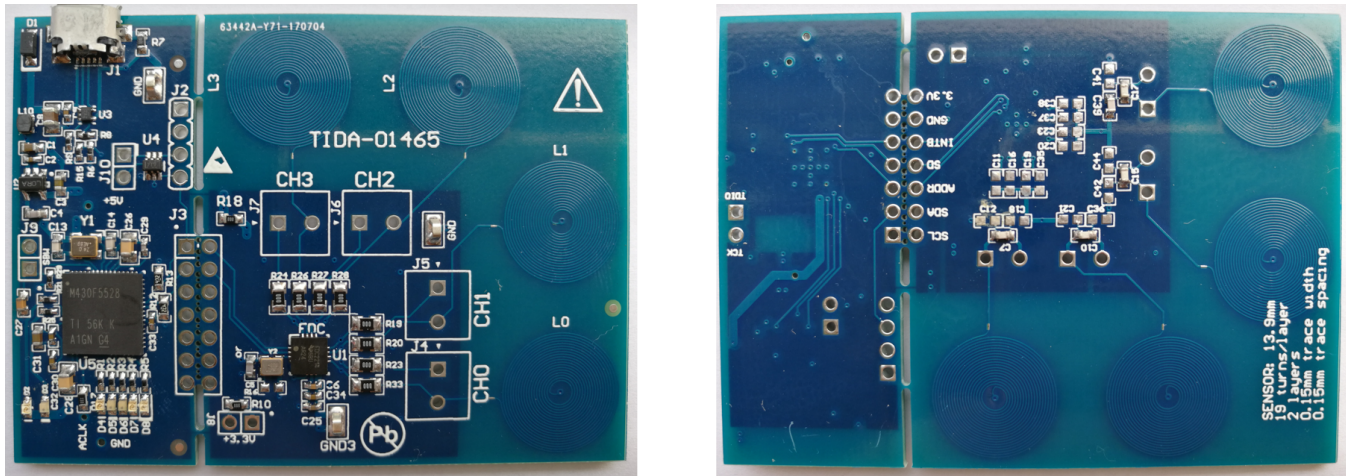


図 22. TIDA-01465 PCB — 上面/底面画像

3.1.1 コネクタ定義

表 3. コネクタ定義

ピン番号	CH1/2/3/4 の定義	J8	J2	J10	J9
1	カスタムセンサ ⁽¹⁾	VDD ⁽²⁾	GND	L ⁽³⁾	JTAG_RST ⁽⁴⁾
2	カスタムセンサ ⁽¹⁾	+3.3V	+3.3V	W ⁽³⁾	JTAG_TEST ⁽⁴⁾
3	—	—	SDA	—	—
4	—	—	SCL	—	—

(1) 4 つのチャネルを選択可能: CH1、CH2、CH3、CH4。各チャネルで、カスタムセンサをコネクタの 1 つのピン(ピン 1 またはピン 2)に接続し、もう一方のピンは空のままにできます。

(2) VDD は FDC2214 の電源であり、0Ω 抵抗により +3.3V に短絡します。

(3) J10 は可変アナログ信号を出力し、これを使用して冷却システムの NTC 温度検知のシミュレーションを行うことができます。

(4) J9 は MCU プログラミング用の予備です。

4 テストと結果

4.1 テスト構成

本節では、ラボテストで使用する物品の詳細とテストプラットフォームの設定手順について述べます。温度などの干渉テストも実施して、さまざまな環境におけるこのリファレンス・デザインの動作を検証しました。

4.1.1 用意する物品

この霜/氷検出リファレンス・デザインの基板とセンサの性能をテストするには、いくつかの物品および機器を用意する必要があります。表 4 にテスト構成に必要な物品とそれぞれの基本的用途を示します。

表 4. 物品の用意

物品	用途
冷蔵庫	冷蔵庫蒸発器の冷却器表面への着霜/着氷をシミュレート
ノートブック PC	測定データを連続的に収集
加湿器	着霜/着氷を高速化
センサ	静電容量技術に基づき霜の厚さを検知
TIDA-01465 基板	静電容量値を検出
温度室	基板の温度ドリフトをテスト

4.1.2 テスト構成手順

以下の手順は、テストに際しラボでテストプラットフォームを構成する方法を示しています。

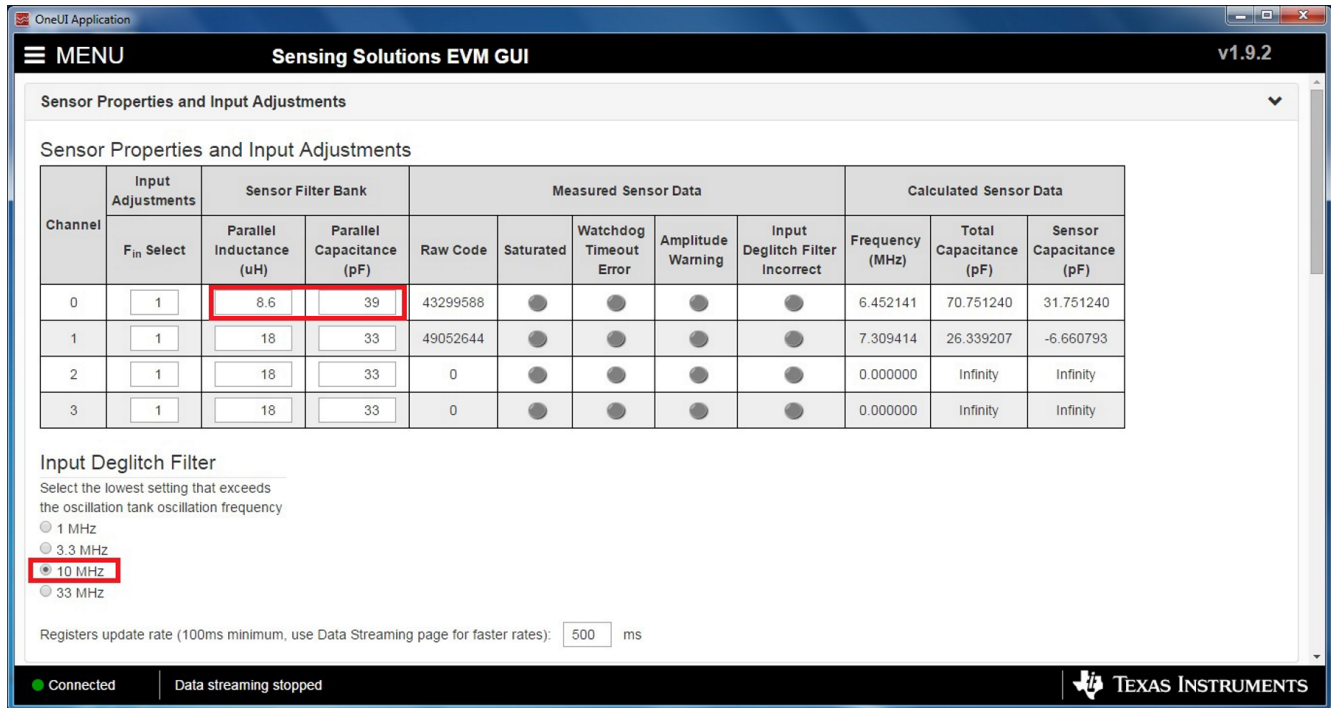
1. 冷蔵庫を準備します。
 1. 電源を切り、冷凍室を開けます。
 2. 蒸発器の前のプラスチック部品を外します。
 3. [図 23](#) に示すように冷却器を露出します。
 4. ドアを開放または半開にした状態で冷却機構が機能することを確認します。ドアを開放すると、霜が蓄積するのに十分な湿気を取り込むことができ、ユーザーもプロセスを確認しやすくなります。



図 23. 冷蔵庫の蒸発器

2. ノートブック PC を準備します。
 1. 『[FDC2114/FDC2214 EVM ユーザーガイド](#)』[2]をダウンロードして、よく読みます。
 2. ノートブック PC にインストールされている Microsoft® Windows®オペレーティングシステムが 64 ビット版 Windows 7 または 64 ビット版 Windows XP であることを確認します。
 3. [Sensing Solutions EVM GUI Tool v1.9.2 \(Rev. C\)](#)ソフトウェアを要求・ダウンロードして、ノートブック PC にインストールします。
 4. ドライバも同時にインストールされていることを確認します。インストールされていない場合、EVM には接続できません。

3. 銅メッシュセンサを冷却器の上面に装着して、TIDA-01465 基板に接続します。基板 GND が冷却器の金属部に接続されていることを確認します。
4. マイクロ USB ケーブルを介して TIDA-01465 基板をコンピュータに接続します。
5. GUI の左下の接続状態をチェックして、正常に接続されていることを確認します。
6. TIDA-01465 リファレンス・デザインを使用して最高の性能を得るには、Sensing Solutions EVM GUI Tool v1.9.2 の一定のパラメータを調整することが重要です。図 24 に示すようにパラメータを設定します。



Sensing Solutions EVM GUI v1.9.2

Sensor Properties and Input Adjustments

Channel	Input Adjustments	Sensor Filter Bank		Measured Sensor Data					Calculated Sensor Data		
	F _{in} Select	Parallel Inductance (uH)	Parallel Capacitance (pF)	Raw Code	Saturated	Watchdog Timeout Error	Amplitude Warning	Input Deglitch Filter Incorrect	Frequency (MHz)	Total Capacitance (pF)	Sensor Capacitance (pF)
0	1	8.6	39	43299588	●	●	●	●	6.452141	70.751240	31.751240
1	1	18	33	49052644	●	●	●	●	7.309414	26.339207	-6.660793
2	1	18	33	0	●	●	●	●	0.000000	Infinity	Infinity
3	1	18	33	0	●	●	●	●	0.000000	Infinity	Infinity

Input Deglitch Filter

Select the lowest setting that exceeds the oscillation tank oscillation frequency

1 MHz
 3.3 MHz
 10 MHz
 33 MHz

Registers update rate (100ms minimum, use Data Streaming page for faster rates): 500 ms

● Connected | Data streaming stopped

図 24. パラメータ設定

7. 冷蔵庫の電源を入れて、冷凍サイクルを起動します。
8. 霜/氷の厚さに基づく静電容量の変化を監視します。

図 25 に最終テスト構成を示します。

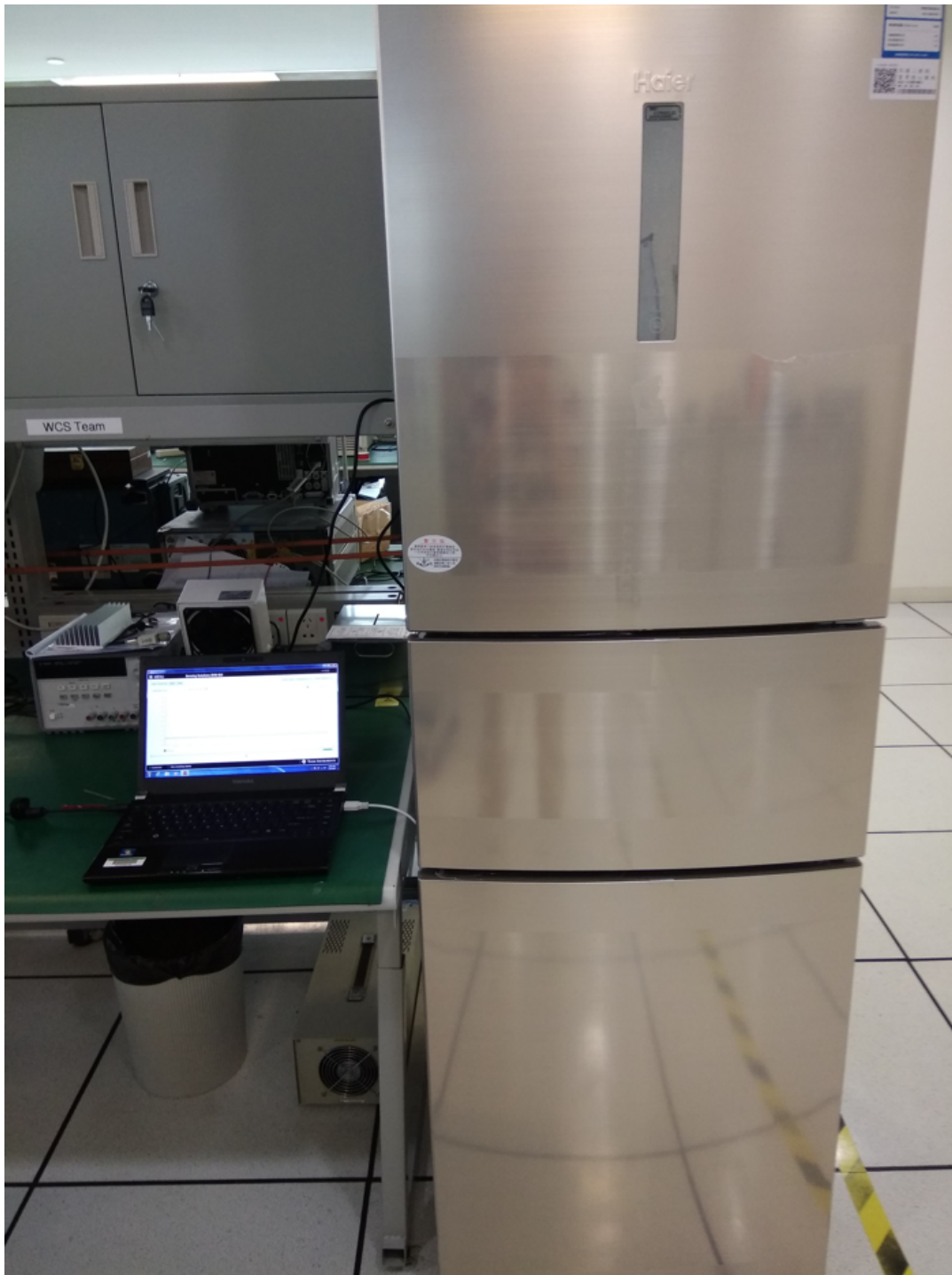


図 25. テスト構成の写真

4.2 テスト結果

このリファレンス・デザインのテスト結果は、複数の項目に分かれており、位置による静電容量再現性、単一サイクルテスト、環境感受性、温度ドリフトテスト、複数サイクル再現性テスト、1.5m ケーブル接続の影響に関するテストのほか、1 週間に及ぶ長期ドリフトテストも実施しました。

4.2.1 位置による静電容量再現性

このテストの目的は、冷却器のさまざまな位置にセンサを配置して静電容量の再現性を検証することです。蒸発器の非対称性により、静電容量はセンサの位置によって変化します。ただし、センサを 1 カ所に固定する場合は、再現性テストにおいて静電容量公差を制限する必要があります。図 26 および図 27 にテスト構成と結果を示します。

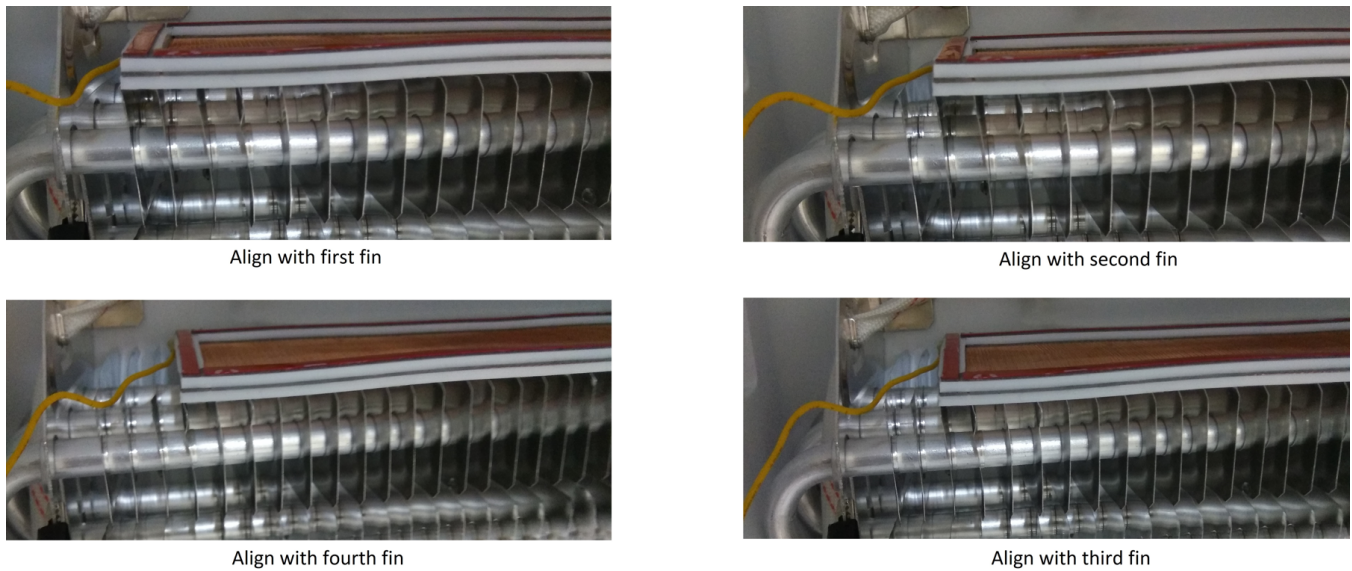


図 26. 位置による静電容量再現性

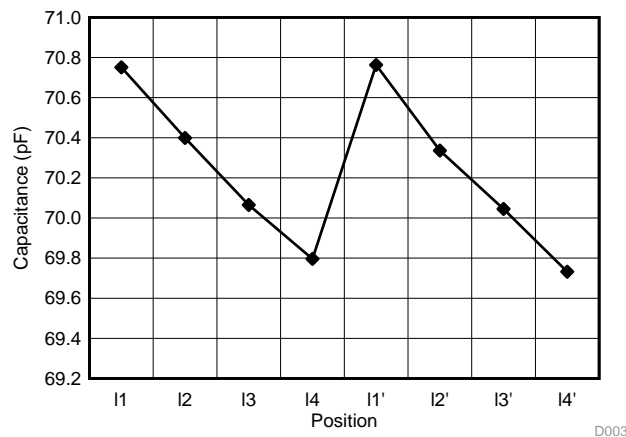


図 27. 静電容量の変動

4.2.2 単一サイクルテスト

図 28 に着霜/着氷 + 除霜 1 サイクルでの静電容量の変化を示します。図 28、図 29、図 30 に示すように、静電容量は霜/氷の厚さに比例します。除霜サイクルが起動すると、静電容量値は短時間で大幅に増大します。これは、氷 ($\epsilon_r = 3.2$) が水 ($\epsilon_r = 80$) に変わることによって比誘電率が変化し、その後、冷却器から水分が消えると元の値に戻るためです。

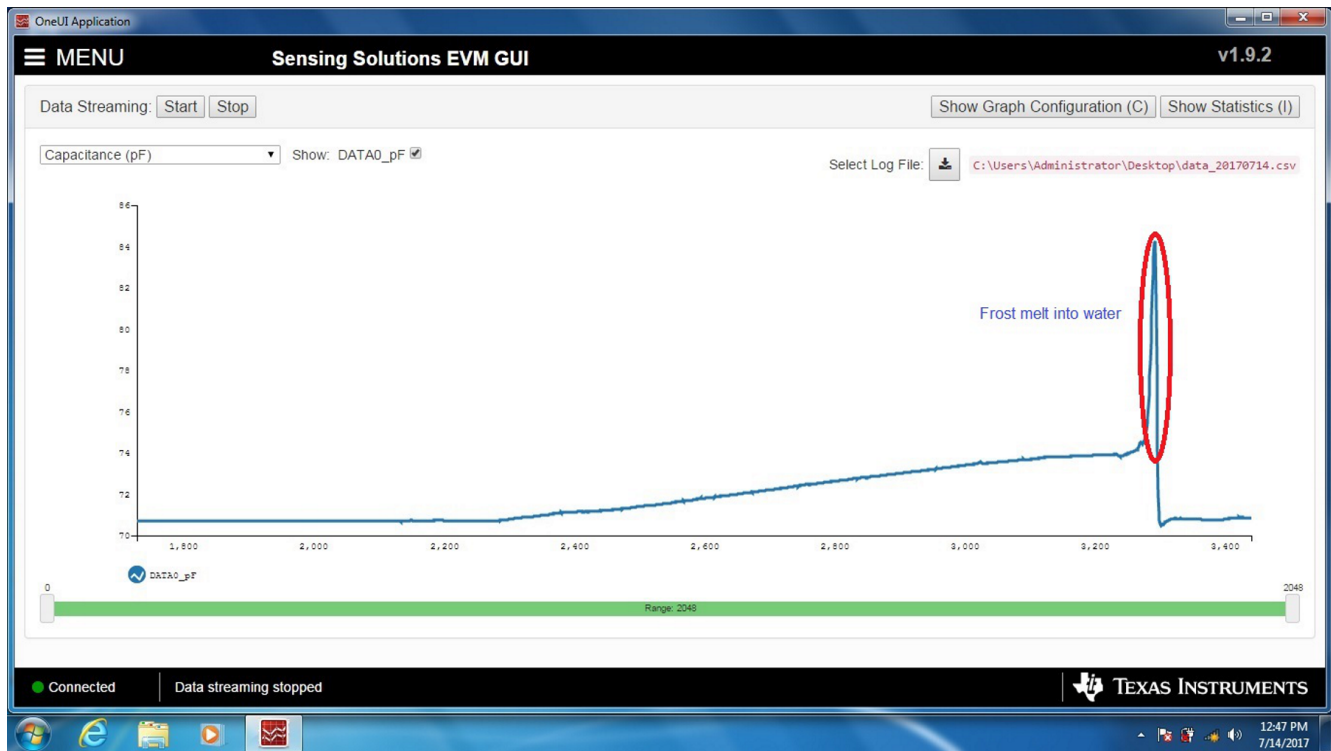
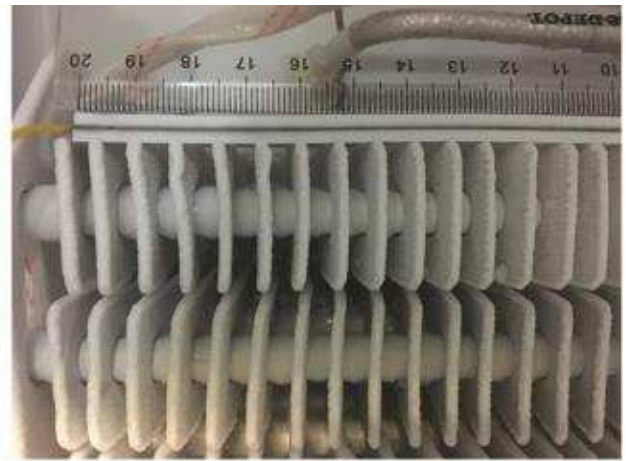


図 28. 単一サイクルテストの概要

図 29 に霜/氷の厚さが異なる 6 つの段階を示します。図 30 にそれぞれの静電容量値を示します。



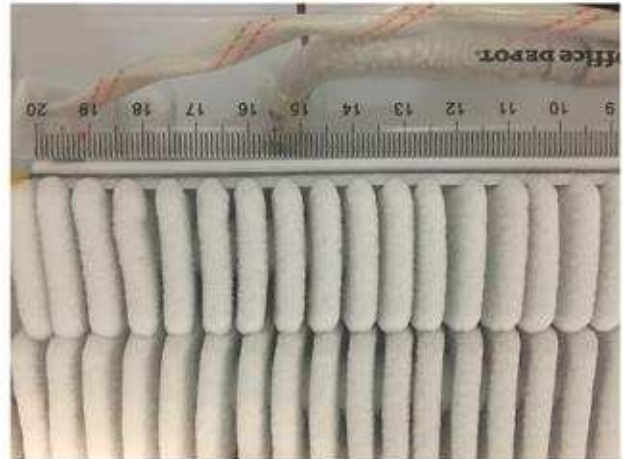
1



2



3



4



5



6

図 29. 着霜プロセス

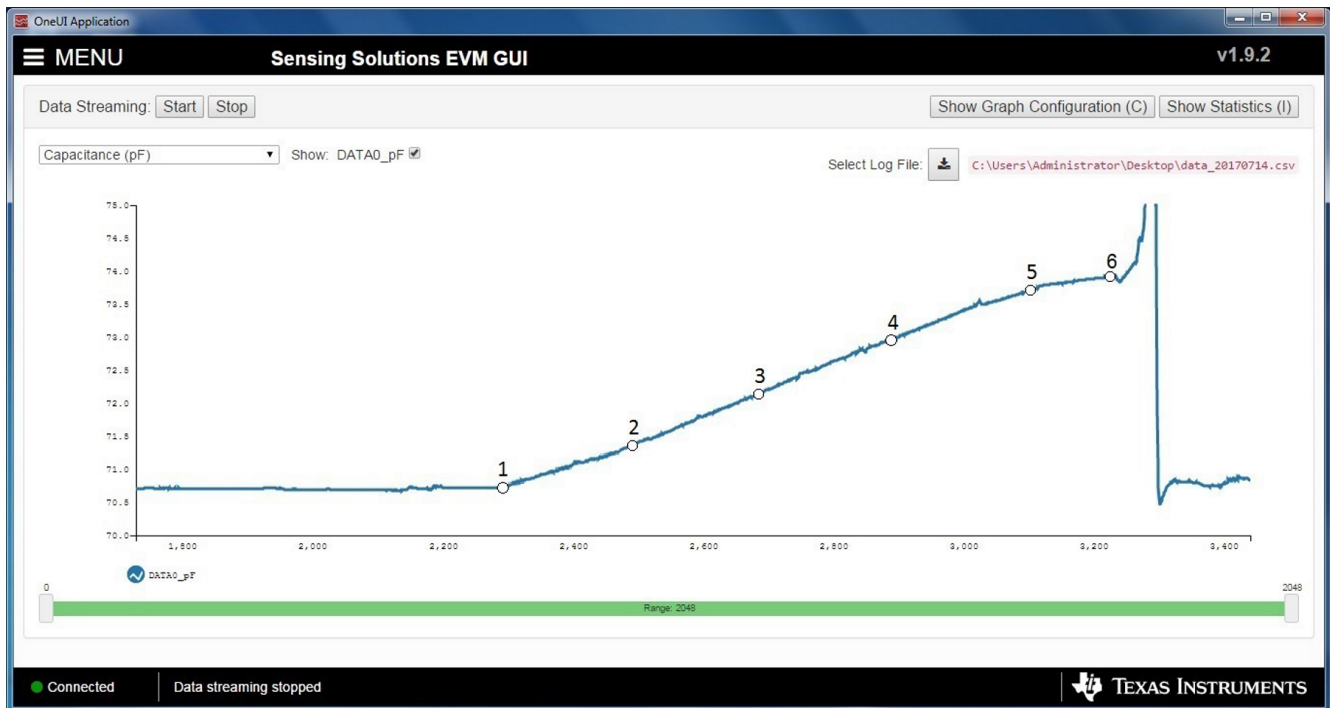


図 30. 着霜プロセス中に検知された静電容量

4.2.3 温度ドリフトテスト

FDC2214 は L-C タンクをセンサとして使用します。L-C タンクの静電容量の変化を共振周波数の変化として観測します。外部の静電容量の変化を検知する上で、オンボード LC の値が安定していることは非常に重要です。このテストの目的は、センサを接続していない基板の温度ドリフトを検証することです。図 31 にテスト構成を示します。

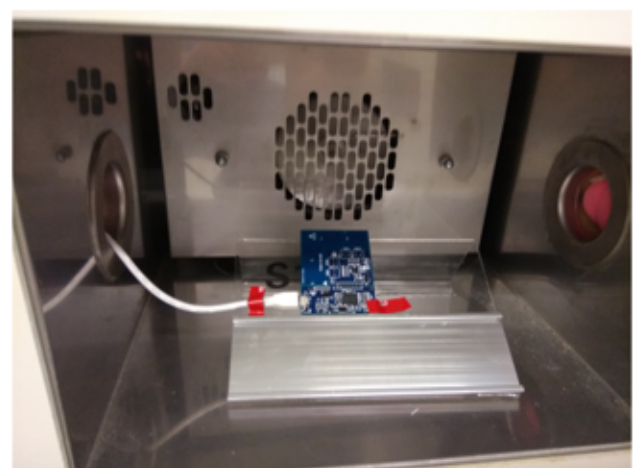
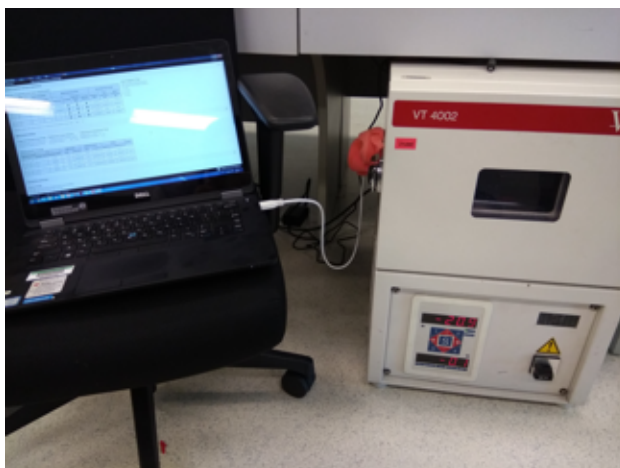


図 31. 温度ドリフトテスト構成

図 32 に PCB コイルと一般的な SMD インダクタの温度ドリフトの比較を示します。このグラフは、SMD インダクタよりも PCB コイルを使用したほうがはるかに安定することを示しています。

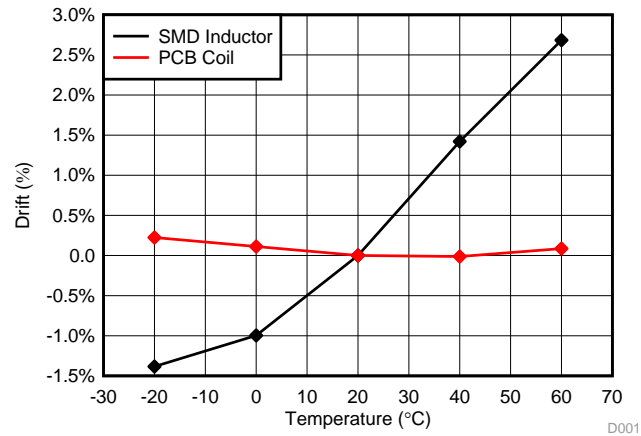


図 32. PCB コイルと一般的な SMD インダクタの静電容量温度ドリフト

4.2.4 環境感受性

付近の人の動きや水滴など、センサ領域周りのよくある環境干渉は、静電容量検知において常に大きな懸念事項とされています。このテストでは、センサ表面に指が触れてからの最悪条件のシナリオをシミュレートし、静電容量の変化を監視します(図 33を参照)。



図 33. 指で触れたセンサ

このテストでは、センサ上面に手を近づけます。記録された静電容量の変動幅は 70.7pF ~ 70.8pF で、まさに無視できるほどの影響しかありません。このテストの目的は、冷蔵庫周りで人体が動くときの影響が出るかどうかを確認することです。結果は、この影響が極めて小さく、霜/氷検出においては無視できる程度であることを示しています。

センサ表面の結露についてもテストしましたが(図 34を参照)、結果は、値の変動幅が 0.1pF 未満であることを示しています。



図 34. センサ表面の結露

4.2.5 長距離ケーブル接続の影響

ケーブル線は線に沿って寄生容量やノイズを拾うため、センサから FDC2114 までの信号路距離をできるだけ短くする必要があります。このテストでは、1.5m 長のケーブルを使用して影響をテストします(図 35を参照)。



図 35. 長距離ケーブルテスト構成

図 36 に示すように、ケーブル寄生容量により、静電容量のベースラインが 70.7pF から 100.5pF に増大しているため、TI は短距離ケーブルの使用を推奨します。ただし、静電容量変化曲線は以前と変わりません。

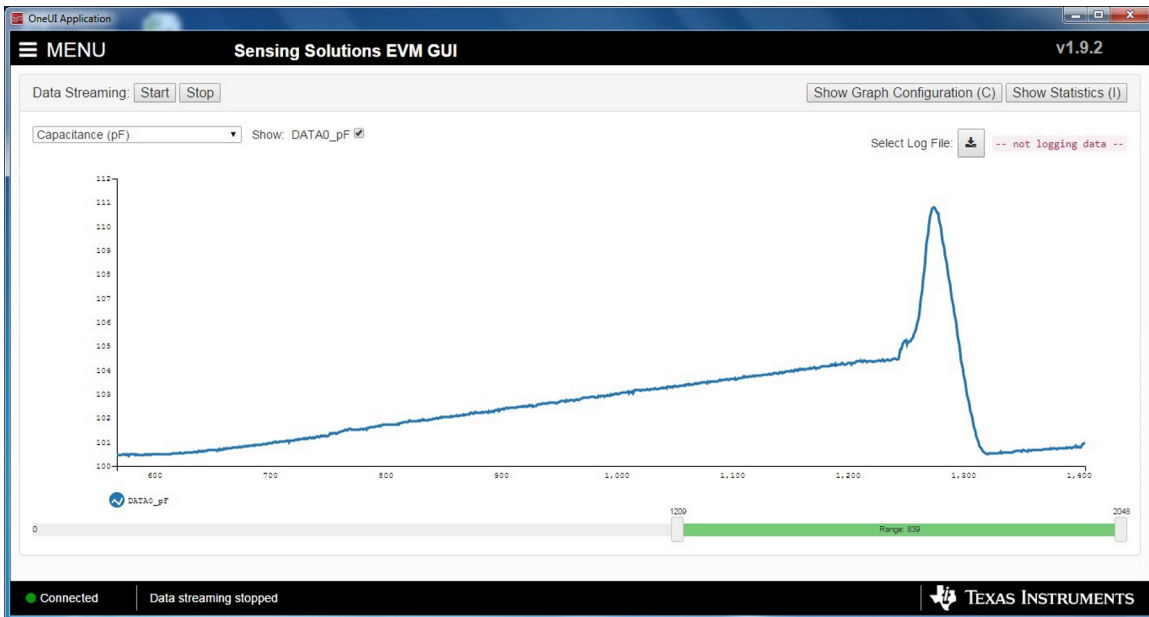


図 36. 単一サイクルでの静電容量曲線

4.2.6 複数サイクル再現性テスト

図 37 に着霜 + 除霜 3 サイクルの静電容量を示します。3 回目では、霜の厚さが限界に達してセンサに接触したため(赤い線内)、静電容量の値は一定を保っています。この特性に応じて、ユーザーは厚さを制限することができます。

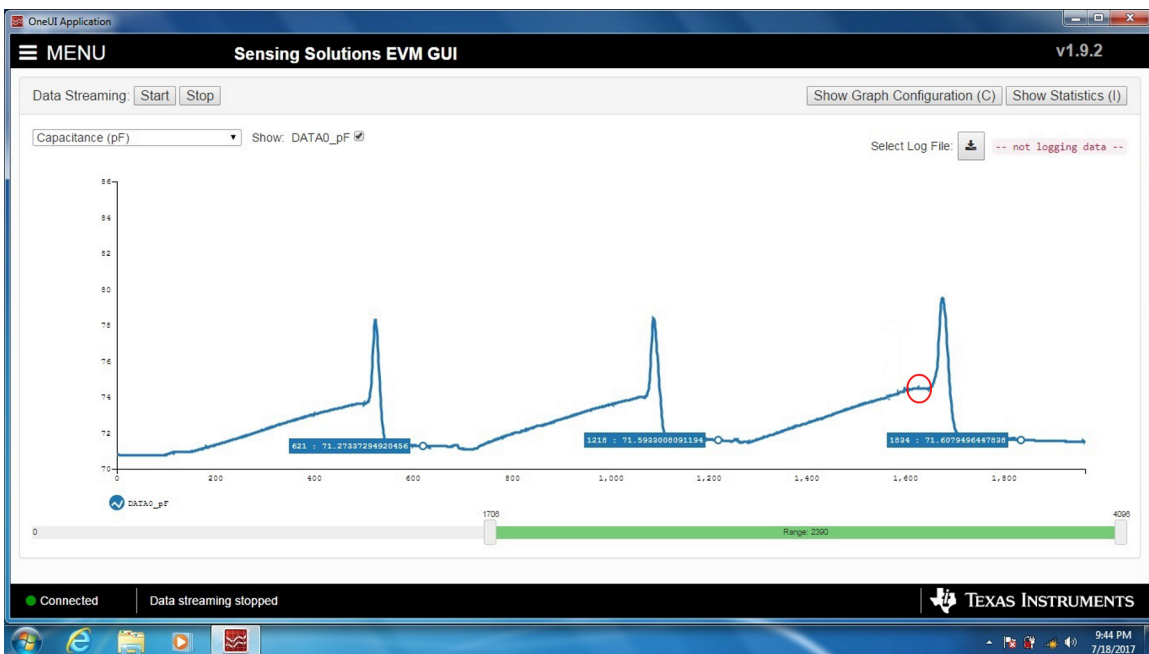


図 37. 複数サイクル再現性テストでの静電容量曲線

5 デザイン・ファイル

5.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-01465](#)のデザイン・ファイルを参照してください。

5.2 部品表

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-01465](#)のデザイン・ファイルを参照してください。

5.3 PCB レイアウトに関する推奨事項

- センサと FDC の間を長いパターンで接続することは避けてください。短いパターンを使用することで、センサ・インダクタ間の寄生容量が低減され、システム性能が向上します。
- マッチングされたチャネル応答が必要なシステムでは、すべてのアクティブ・チャネルのパターン長を一致させる必要があります。

5.3.1 レイアウト・プリント

レイアウト・プリントをダウンロードするには、[TIDA-01465](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

5.4 Altium プロジェクト

Altium プロジェクトファイルをダウンロードするには、[TIDA-01465](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

5.5 ガーバー・ファイル

ガーバー・ファイルをダウンロードするには、[TIDA-01465](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

5.6 組立図面

組立図面をダウンロードするには、[TIDA-01465](#) のデザイン・ファイルを参照してください。

6 関連資料

1. テキサス・インスツルメンツ、『[FDC2x1xEMI 耐性、28 ビット、12 ビット、キャパシタンス - デジタル・コンバータ、近接およびレベル・センシング・アプリケーション用](#)』、FDC2214 特性表 (SNOSCZ5)
2. テキサス・インスツルメンツ、『[FDC2114/FDC2214 EVM ユーザーガイド](#)』、FDC2114/FDC2214 ユーザーガイド (SNOU138)
3. テキサス・インスツルメンツ、『[有効範囲最大 30cm、SNR 15dB 超の近接検知と安定した静電容量式タッチのリファレンス・デザイン](#)』、TIDA-00474 リファレンス・デザイン (TIDUAU2)
4. テキサス・インスツルメンツ、『[周辺光および近接センサによるバックライトおよびスマート・ライティング制御](#)』、TIDA-00754 リファレンス・デザイン (TIDUB42)
5. テキサス・インスツルメンツ、『[FDC1004: 静電容量検知の基本と用途](#)』、アプリケーション・レポート (SNOA927)

6.1 商標

MSP430 is a trademark of Texas Instruments.

Microsoft, Windows are registered trademarks of Microsoft Corporation.

すべての商標および登録商標はそれぞれの所有者に帰属します。

7 著者について

YICHANG (RICHARD) WANG は、テキサス・インスツルメンツのシステム・アーキテクトであり、産業用リファレンス・デザインの開発を担当しています。パワーエレクトロニクス、高周波 DC-DC/AC-DC コンバータ、アナログ回路設計等を含む、家電機器における幅広い経験をこの職務に活かしており、中国の南京航空航天大学で電気工学・オートメーションの修士号を取得しています。

TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関係する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的での、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、もしくは、TIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterms.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。