

サーマルダイオード赤外線センサ “MeIDIR”とユーザーサポートツール

相原育貴*
Yasuki Aihara
奥田聡志*
Satoshi Okuda
服部公春*
Masaharu Hattori

立岡靖晃*
Yasuaki Tatsuoka
高橋貴紀*
Takanori Takahashi

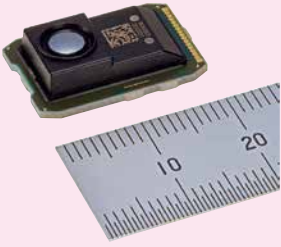
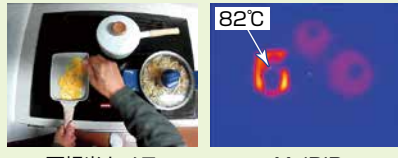
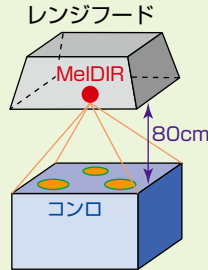
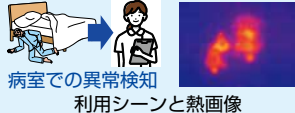
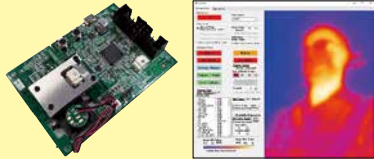

Thermal Diode Infrared Sensor "MeIDIR" and User Support Tools

要旨

赤外線センサ“MeIDIR”は、三菱電機独自のサーマルダイオード方式を採用して2019年に発売した。高画素と高温分解能を特長として、エアコン、見守り、温度測定など様々な分野で採用されている。当初は生活圏内での人及び背景の温度情報把握を想定していたため、検知温度範囲を-5~+60℃としていた。しかし、安全管理や快適な作業環境づくりを目的として、より高温になるキッチンや工場設備の温度分布などの把握に対するニーズが高いことが分かった。このため、広範囲な温度分布の測定が可能な赤外線センサ“MIR8060B3”を開発した。検知温度範囲を-5~+200℃として、高温測定の市場に対応できるようにした。

また、これまでは顧客の量産開始に至るまでに要する期間が長いことが課題になっていたため、開発の全段階でサポートを行う“ユーザーサポートツール”を充実させた。コンセプト検討段階では提案書でMeIDIRの評価開始を促す。評価の段階ではデモキットと画像表示ソフトウェアを提供して評価期間の短縮に貢献する。製品企画、設計・試作段階ではリファレンスデザインを準備して設計情報を提供し、製品化までの期間短縮に貢献する。

これらの製品とサポートツールを用いて多種多様な分野への適用拡大を図り、安心・安全かつ健康で快適な社会の実現に貢献する。

 <p>MIR8060B3</p>	<table border="1"> <tr> <th>型名</th> <td>MIR8060B3</td> </tr> <tr> <th>発売時期</th> <td>2023年5月(予定)</td> </tr> <tr> <th>検知可能温度範囲</th> <td>-5~+200℃</td> </tr> <tr> <th>画素数</th> <td>80×60</td> </tr> <tr> <th>画角</th> <td>78°×53°(典型値)</td> </tr> <tr> <th>フレームレート</th> <td>4/8fps(選択)</td> </tr> <tr> <th>温度分解能</th> <td>400mK(典型値)</td> </tr> <tr> <th>消費電力</th> <td>50mA以下</td> </tr> <tr> <th>製品サイズ</th> <td>19.5×13.5×9.5mm</td> </tr> </table>	型名	MIR8060B3	発売時期	2023年5月(予定)	検知可能温度範囲	-5~+200℃	画素数	80×60	画角	78°×53°(典型値)	フレームレート	4/8fps(選択)	温度分解能	400mK(典型値)	消費電力	50mA以下	製品サイズ	19.5×13.5×9.5mm	 <p>可視光カメラ MeIDIR</p> <p>キッチン撮影例</p>	 <p>レンジフード MeIDIR 80cm コンロ 配置</p>
	型名	MIR8060B3																			
	発売時期	2023年5月(予定)																			
	検知可能温度範囲	-5~+200℃																			
	画素数	80×60																			
	画角	78°×53°(典型値)																			
	フレームレート	4/8fps(選択)																			
温度分解能	400mK(典型値)																				
消費電力	50mA以下																				
製品サイズ	19.5×13.5×9.5mm																				
 <p>病室での異常検知 利用シーンと熱画像</p> <p>赤外線センサ (MeIDIR) 独立型・既設置システムの活用が容易 (モジュール追加) →大規模なシステム改修は不要</p> <p>①解析結果を送信 (23:30 101号室 転倒の疑い)</p> <p>②アラームを発生 (熱画像を送信)</p> <p>見守り対象場所 コントローラ ナースセンター 既設置システム</p> <p>提案書</p>	 <p>デモキット EVAシリーズ</p> <p>画像表示ソフトウェア</p> <p>デモキット</p>	 <p>Gerberデータ リファレンスコード</p> <p>BOMリスト</p> <p>検知アルゴリズム学習器</p> <p>リファレンスデザイン</p> <p>ドキュメント</p>																			
			<p>ユーザーサポートツールで開発の全段階をサポート</p>																		

BOM : Bill of Materials

サーマルダイオード赤外線センサMeIDIRとユーザーサポートツール

検知温度範囲を従来の-5~+60℃から-5~+200℃に拡張したサーマルダイオード赤外線センサMIR8060B3を2023年5月に発売開始予定である。キッチンや工場設備監視など、より高温の被写体を対象とした市場ニーズに対応する製品である。また充実したユーザーサポートツールを準備して開発の全段階でサポートを行うことで、顧客の製品化までの期間短縮に貢献する。

1. ま え が き

波長380nm(青)~780nm(赤)の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼び、その中でも、8~14 μm の赤外線を、長波長赤外又はLWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼んでいる。このLWIR域の光を検出するセンサを一般的に赤外線センサという。常温程度の熱源から放射される光はこのLWIR域にピークを持つことから、赤外線センサは人を検知する目的で広く用いられている。可視光によるカメラと異なり赤外線センサでは個人の特定が困難なことから、プライバシーを確保しながら人や物の検知ができるという特長がある。これは近年機運が高まっているウェルビーイングとの親和性が良いため、赤外線センサに対する注目度が向上する要因になっている。また、人だけでなく安全を目的とした工場設備の監視やキッチンでの温度管理など幅広い分野で活用されている。

本稿では、当社独自の技術を採用したサーマルダイオード赤外線センサMeIDIRの特長と、顧客が製品化するまでの一連のプロセスを手伝うユーザーサポートツールの開発について述べる。

2. サーマルダイオード赤外線センサ

2.1 赤外線の性質

絶対温度0K以上の全ての物体は電磁波を放射する性質を持っており、黒体(全ての波長の放射を吸収するような物体)に対する波長当たりの放射量(放射発散度)は次の式で表される(プランクの放射則)。

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}^{-1} \left[\frac{W}{(\mu\text{m} \cdot \text{m}^2)} \right]$$

$$C_1 = 3.74 \times 10^8 \left[W \cdot \frac{\mu\text{m}^4}{\text{m}^2} \right]$$

$$C_2 = 1.44 \times 10^4 [\mu\text{m} \cdot K]$$

λ : 波長, T : 絶対温度[K], C_1, C_2 : 放射定数

図1は、LWIRが極低温から放射され300K付近の常温域でピークを迎えるのに対して、可視光は現実的な人間活動の温度領域ではほとんど放射されないことを意味する。

実際の物体の電磁波の放射量は物体表面状態に依存する放射率 ε によって異なる。放射率は吸収率に等しく、反射率の大きい物質や透過率の大きい物質では放射率は小さくなる。放射率は通常物体の表面状態によって異なり、例えば人体であれば0.98程度であるのに対して、研磨したアルミニウムだと0.04程度になる。また、電磁波は大気中で水蒸気や二酸化炭素によって吸収される性質があるが、波長

が8~14 μm の領域は吸収が少なく、“大気の窓”と呼ばれ遠方の熱源の検出に特に優れた特性を持っている。さらに赤外線は可視光との波長の差が大きいため、その影響を受けにくく、波長が長いと可視光と比べて散乱しにくい性質を持っている。

このような性質から赤外線は簡単な熱源検知から、長距離の温度分布測定やリモートセンシングまで幅広い用途で利用されている。

2.2 赤外線センサ

赤外線センサは、赤外線を受光して電気信号に変換することで、非接触で物体の熱を検知/可視化する機能を持つ。図2に示すとおり、次の三つの特長がある。

- (1) 熱源の温度情報を非接触で取得できるので、衛生面や安全面で優れている。
- (2) 熱源のシルエットから人の動作や姿勢を判断できる。これは特にプライバシーの保護が必要な場面で有効で、カメラを設置できないトイレや浴室などでも活用できる。
- (3) 暗闇や見通しの利かない煙の中でも熱源検知できるので、夜間の室内などでも安心して使用できる。

赤外線センサは検知方式から大きく量子型と熱型に分類される。量子型はCCD(Charge Coupled Device)などの一般的な可視光センサと同様に光電効果によって発生する電荷を検出する方式で、感度は高いが熱雑音の影響を低減するため冷却装置を必要として、利用分野が限定される。熱型は赤外線を検知部が吸収した結果生じる温度変化を電気信号に変換する方式で、量子型と比べて感度は低いですが冷却が不要で幅広い用途に活用されている。

一般的に広く使われている熱型赤外線センサは、従来、温度変化を検出する方式としては、焦電センサ方式、サーモパイル方式、ボロメータ方式の3方式が主流であった。

焦電センサは強誘電体の分極変化を検出する方式で、消費エネルギーが小さく製造コストも安いという利点がある

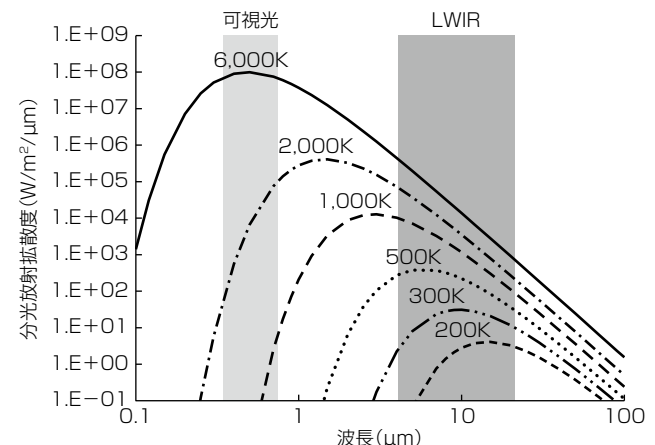


図1. 黒体からの電磁波の放射量と波長の関係



図2. 赤外線センサの特長

が、温度変化に対して起電力が発生するため静止した物体の検知に不向きであり、また製造方法から多画素化には不向きなため、簡単な人感センサなどに利用されている。

サーモパイルは異種金属を接合した熱電対を画素の熱検出に利用しているため、省電力で半導体製造技術を使って製造することが可能で多画素化も可能という特長を持っている。その一方で、単一熱電対の感度が低く、実用的な感度を得るために多数の熱電対を直列接続する必要があり、画素サイズが大きく多画素化を行うとセンサチップサイズや光学系が大きくなり急速に製造コストが高くなるため、比較的画素数の少ないセンサに利用されている。

ボロメータは抵抗の温度による抵抗値の変化を利用する方式で、半導体製造工程と相性が良く、抵抗体の熱電変換効率が優れているため感度が高いという利点があり、多画素化に向いている方式である。しかし、熱電変換の特性が非線形なため、受光面内の画素ごとの出力特性を一定にするための補正処理が必要で、補正演算や補正值を記憶するための半導体素子が必要になる。また補正值の取得のための調整・検査コストもありセンサ価格が高価になる。

2.3 サーマルダイオード方式

当社ではダイオードを熱検知部として独自のサーマルダイオード方式を開発した。サーマルダイオード方式は温度検知部に一般的なシリコン半導体製造工程で形成されるPN接合ダイオードを使用することを特徴としており、ボロメータと同様、半導体工程との相性が良く多画素化が容易な方式である。熱検知部のダイオードは順方向に定電流で駆動し、温度による電圧変動を検出することで熱電変換を行っている。

ダイオードの順方向電圧は温度に対して線形に変化する特性を持ち、その電圧特性は半導体工程の注入条件等で決まるため、ばらつきが少なく同一チップ内の画素が均一に製造できる。

3. サーマルダイオード赤外線センサMeiDIR

3.1 赤外線センサモジュール“MeiDIRシリーズ”

従来の赤外線センサ市場は低画素・低価格の熱検知用途の製品と、高画素・高価格の赤外線イメージング用途の赤外線カメラに二極化していた。簡単な赤外線イメージングが可能でかつ低価格な製品は以前から要求があったが、2章に述べたようなセンサ技術の制約で低価格なセンサを市場に提供できなかった。

当社は独自のサーマルダイオード方式のセンサ素子を使用した、これまでになかった高画素で低価格な赤外線センサモジュールとしてMeiDIRを開発した。表1に製品ラインアップを示す。2019年にMIR8032B1を市場投入し、これまで国内を中心に高齢者施設での見守り分野や空調機器に搭載されるセンサとして、測定可能な温度範囲-5~+60℃の環境で使用されている。市場では、これらの分野以外にも、高温の対象物を取り扱う際の安全管理や快適な作業環境づくりを目的として、高温になるキッチンや工場設備の温度分布などの把握に対するニーズがあり、より広範囲な温度分布の測定が可能な赤外線センサが求められている。このため、2023年5月にMIR8060B3を発売開始予定である。これは信号処理とレンズの最適化によって上限+200℃までの高温や広範囲な温度分布の測定を可能にして、キッチンや工場設備監視等の市場ニーズにも対応できる製品である。

3.2 MeiDIRの高感度化技術

熱型赤外線センサは温度検知部の温度上昇を熱電変換するため、温度検知部と周辺環境との間の熱コンダクタンスが高いと検知感度が低下する。また、周辺画素との間の熱

表1. MeiDIRの製品ラインアップ

型名	MIR8060B3	MIR8060B1	MIR8032B1
発売時期	2023年5月(予定)	2021年7月	2019年11月
検知可能温度範囲	-5~+200(℃)	-5~+60(℃)	-5~+60(℃)
画素数	80×60	80×60	80×32
画角	78°×53° (典型値)	78°×53° (典型値)	78°×29° (典型値)
フレームレート	4/8 fps(選択)	4/8 fps(選択)	4 fps(固定)
温度分解能	400mK(典型値)	100mK(典型値)	100mK(典型値)
消費電力	50mA以下		
製品サイズ	19.5×13.5×9.5(mm)		
通信インタフェース	SPI(Serial Peripheral Interface)		

コンダクタンスが高いと画素で検出した熱が周辺画素に伝わるため分解能が低下する。そのためMelDIRでは画素であるダイオードと画素を形成する母材であるシリコン基板との間を中空化して、ダイオードを支持脚で保持する構造を形成し、この支持脚の中に配線を通すことでシリコン基板との間の熱コンダクタンスを下げつつ、構造維持と電気的な接続を実現している。この支持脚構造は薄膜SOI(Silicon On Insulator)基板を用いて温度検知部のダイオード構造と周辺の読み出し回路等をシリコン半導体製造工程で形成後ドライエッチングを行うことで形成しており、低コストで製造できる。図3にMelDIRの温度検知部の拡大写真を示す。25 μm ピッチの温度検知部が支持脚構造によって保持される中空構造が均一に形成できていることが確認できる。

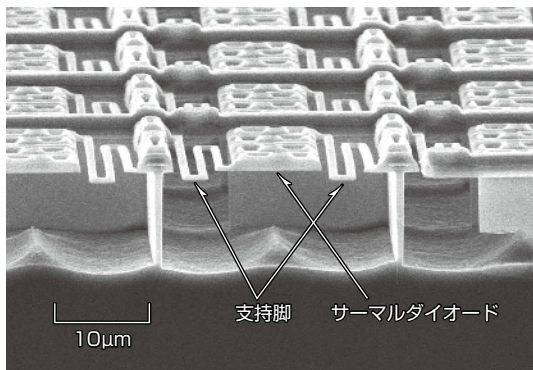


図3. MelDIRの温度検知部の拡大写真

4. ユーザーサポートツール

4.1 提案書

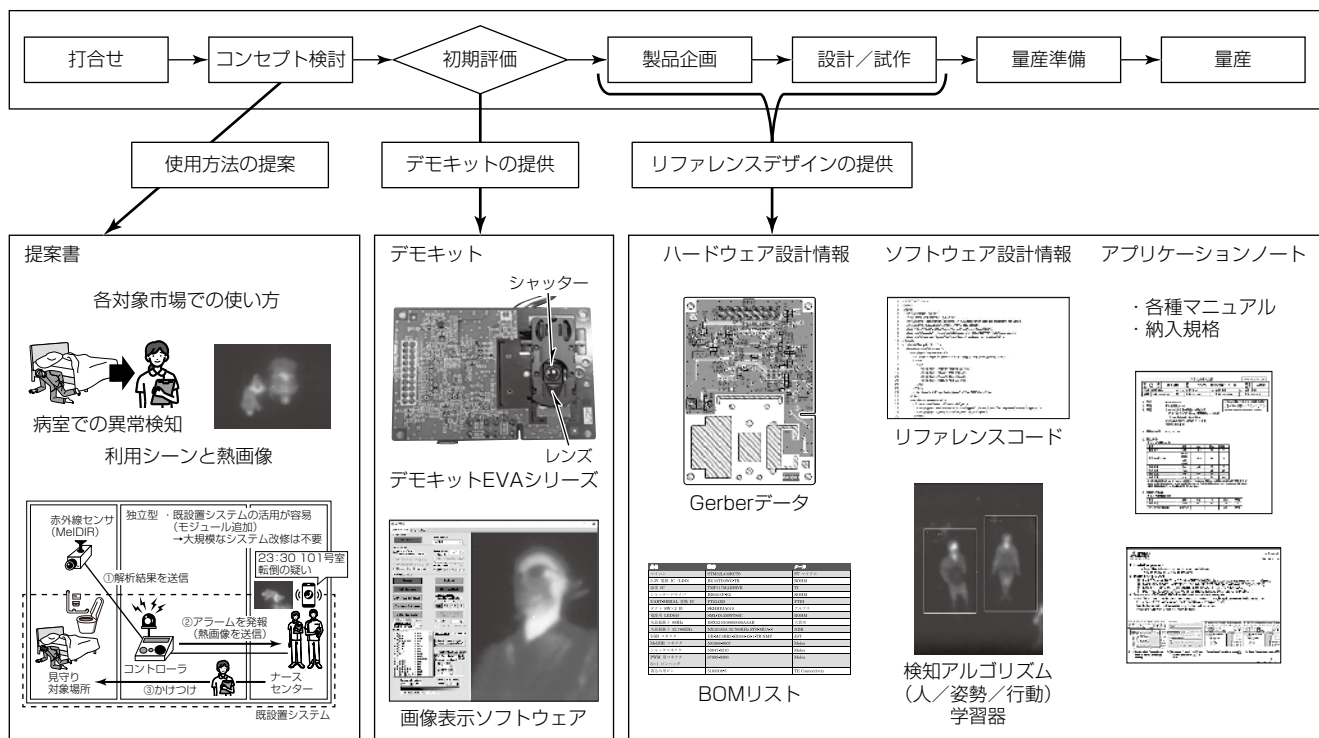
図4に一連のユーザーサポートツール群を示す。顧客の製品コンセプトを検討する段階をサポートするために提案書を準備している。MelDIRを使用するイメージを持ってもらうための豊富な熱画像例やMelDIR採用のメリットなどを示して、評価開始してもらうための足掛かりとなる内容になっている。

4.2 デモキット

顧客にMelDIRを評価してもらうために専用のデモキットを用いる。使い勝手をより向上させるためにMelDIR, シャッター, 基板などを一体化させた。さらに基板面積を従来の約45%にまで小型化したデモキットEVAシリーズを2022年に開発して提供開始している。図5にデモキットの写真を示す。ケーブル接続及びドライバとビューソフトウェアをインストールすることで容易に使用開始でき、評価の準備から完了までの期間短縮に貢献している。

4.3 リファレンスデザイン

顧客の製品開発段階に必要なハードウェア/ソフトウェア設計情報を提供するために、リファレンスデザインを開



製品開発の全段階でサポート

図4. MelDIRのユーザーサポートツール



図5. デモキットEVA-MIR8060B1-MC02V1-01

発した。リファレンスデザインはデモキットEVAシリーズの設計情報をまとめたものであり、BOMやGerberなどのハードウェア設計情報、リファレンスコードやディープラーニングによるオブジェクト検知などのソフトウェア設計情報、各種マニュアルなどのアプリケーションノートから成る。これらを活用してもらうことによって、製品開発期間の短縮に貢献する。

4.4 ディープラーニングを用いた熱源検知

4.4.1 熱源検知アルゴリズム

リファレンスデザインの中でディープラーニングを用いた熱源検知のアルゴリズムを提供している。YOLO (You Only Look Once)をベースとした検知アルゴリズムをMeIDIR用に最適化し、組み込み用の汎用MCU (Micro Controller Unit)をターゲットにエッジAIとして開発している点の特徴である。表2に熱源検知アルゴリズムとハードウェアの仕様を示す。

2022年11月の段階では、リビング内にいる人を検知する人検知アルゴリズムと、トイレでの姿勢を検知して異常かどうかを判断する姿勢検知アルゴリズムの二つを提供している。

表2. 熱源検知アルゴリズムとハードウェアの仕様

項目	仕様
MeIDIR型番	MIR8060B1-01
MCUボード型番	MCU-NUH723-MD**V*
リファレンスコード型番	SAPM-MD**V*
ターゲットMCU	STM32H723_G(Cortex-M7 1177 DMIPS@530MHz)
ディープラーニングアルゴリズム	MobileNetV2-YOLOv3-Nano
Rom size	< 1 Mbyte
Ram size	< 512Kbyte
Frame rate	7 fps (= 142ms/frame)

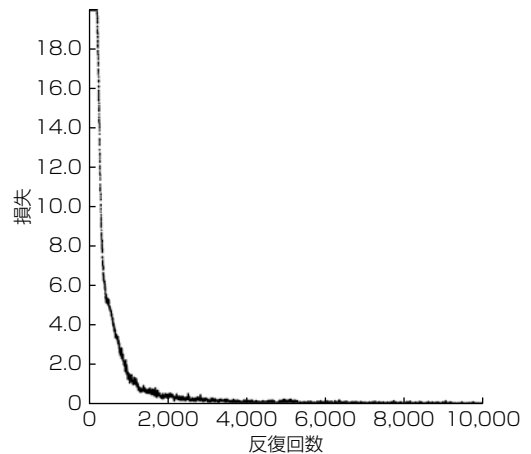


図6. 学習結果の例

4.4.2 モデル学習器

提供している検知アルゴリズムでは、顧客の使用条件によっては十分な検知精度を得られない場合がある。このため、それぞれの使用環境に合わせたAIモデルの作成を目的とした“MeIDIR向け学習器(MTT-V001)”を開発して提供している。さらに、グレースケール画像の抽出、アノテーション、AIモデル作成、マイコンへの組み込みの一連の作業手順をまとめたマニュアルの整備もしており、顧客自身で自社製品に最適化できる環境を整えている。

図6に学習結果の一例を示す。反復回数の増加に伴い損失が減少して計算が収束していることを示す。この例では、10,000回の学習で検知率の指標であるmAP(mean Average Precision)は80%以上を実現している。

5. む す び

MeIDIRの新製品として、検知温度範囲上限を従来の+60℃から+200℃に拡大したMIR8060B3を2023年5月に発売開始予定である。ニーズが大きかった工場設備の監視やキッチンでの温度管理などに対応できるようにする。また、顧客の評価及び製品開発を支援するユーザーサポートツールを充実化し、製品化までの時間短縮に貢献する。デモキットは使い勝手向上のためにMeIDIR、シャッター、基板などを一体化させ、さらに基板面積を従来の約45%にまで小型化したEVAシリーズを開発した。さらに、顧客の製品開発に必要なハードウェア/ソフトウェア設計情報を提供するためにリファレンスデザインを整備した。

これら製品群とサポートツールを用いて多種多様な分野への適用拡大を図り、安心・安全かつ健康で快適な社会の実現に貢献する。