

室内空気品質監視器:概念と実装

序説

著者: Ankit Phougat, Namrata Dalvi, Microchip Technology Inc.

大気汚染とは大気に浮遊する広範囲の気体、液体、個体を示し、これは人の健康に有害な影響を持ちます。殆どの人々がそれらのかなりの時間の量を室内で過ごすため、室内の空気汚染と環境は人の健康に決定的な影響を持ちます。室内空気汚染は世界の最大の環境問題の1つです。[世界保健機関](#)からの数に基づくと、毎年380万人が家庭の大気汚染に起因する病気で早死します。従って、絶えず空気品質監視のために職場でと家庭で良い空気品質監視器を持つことが重要です。

室内空気は総揮発性有機化合物(TVOC: Total Volatile Organic Components)、二酸化炭素(CO₂)、直径2.5µmまでの粉塵を持つ粒子状物質(PM2.5)のような主要な気中浮遊汚染物質を持ちます。室内空気は品質に影響を及ぼす別の2つの要素、室内環境の湿度と温度を持ちます。室内空気品質監視器(AQM: Air Quality Monitor)はこれらの汚染物質と要素の値を測定する実時間監視システムです。賢く安全なAQMIは実時間データモード化、実時間汚染データ関連付け、賢い通知、それと自動化した報告を生成するために無線通信媒体を通してクラウドサーバーへ監視した空気品質要素を送信する能力があります。

この応用実演部では8ビットAVRプロセッサを特徴とするATmega4808マイクロコントローラ(AVR® MCU)のコアから独立した周辺機能(CIPs: Core Independent Peripherals)と知的なアナログ周辺機能を使ってAQMIシステムを設計、実装されています。MicrochipのCryptoAuthentication™安全素子(ATECC608A)と完全に認定されたWi-Fi®単位部(ATWINC1510)は賢いAQMIをGoogle Cloud™ IoT核基盤へ安全に接続するのに使われます。

応用実演はMicrochipのAVR-IoT WG開発基板、MikroElektronikaの感知器といくつかのClick基板を使って実現されます。AVR-IoT WG開発基板については[AVR-IoT WG開発基板製品頁](#)を参照してください。

AQM文書概要

以下の文書がAQMIシステム資料を網羅します。

1. この使用者の手引きはAQMIシステムのハードウェアとファームウェアの概要とそれの電力考察を記述します。
2. 「AN3417 - 室内空気品質監視器: Atmel STARTとMPLAB®コード構成部(MCC)を使うファームウェア作成」補足ファームウェア作成の指針はAQMI応用に対するAVR-IoT階層の使い方を網羅します。更に、Atmel STARTとMCCを使ってマイクロコントローラ周辺機能とClick基板の構成設定詳細を網羅します。
3. 「室内空気品質監視器: 使用者の手引き」はハードウェア準備、ハードウェア接続、動作手順、LED表示、AVR-IoT WG開発基板のWi-Fi単位部の準備、クラウド上でのAQMIデータの可視化を網羅します。

屋外と室内の空気品質の概要

屋外の大気汚染は良く知られ、主に産業排出物、自動車の排気、煤煙と他の要素のためです。

室内空気品質は居住者の健康、快適性、幸福、生産性での大気汚染の重要な影響のため、会社や家での主要な関心事です。科学的調査は室内大気汚染のために世界中で毎年多くの早死が報告されていることを示します。世界保健機関(WHO: World Health Organization)によると、これらの死は肺炎、脳卒中、虚血性心疾患、慢性閉塞性肺疾患(COPD)、肺がんに起因します。

殆どの野外空気品質監視システムや監視局は国や州の政府機関によって設立されています。これらの空気品質感知器や監視器は殆どオゾン、自動車排ガス、粒子汚染、二酸化窒素(NO₂)、二酸化硫黄(SO₂)、一酸化炭素(CO)のような毒素を検出するように設計されます。

一方で、室内空気品質監視器はもっと頻繁に粒子汚染(PM2.5、PM10)、揮発性有機化合物(VOC)、二酸化炭素(CO₂)を検出するように設計されます。

直径2.5µmの粒子を持つPM2.5粒子状物質は最も危険な大気汚染の中の1つです。これらの小さな大きさのため、PM2.5粒子は人の肺に深く移動し、例えば、喘息発作を誘発したり、心血管疾患に寄与したりすることによって様々な健康問題を引き起こし得ます。TVOCは室内衛生と室内空気品質に対する重要な指標と見做されます。TVOC水準上昇は頭痛と刺激作用を引き起こし得ます。いくつかのTVOCは発がん性物質(例えば、ホルムアルデヒド)であり、いくつかは通常水準での刺激物質(例えば、トルエン)です。

本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Microchip社とは無関係であることを御承知ください。しおりの[はじめに]での内容にご注意ください。

従って、TVOC水準の測定は室内空気品質監視器の場合に重要です。室内環境でのより高い二酸化炭素水準は居住者を眠くさせ、頭痛にさせ、より低い活動水準で機能させるかもしれません。室内CO₂水準は室内居住者密度と代謝活動に対する屋外換気妥当性の指標です。従って、CO₂水準は室内空気品質監視器によって測定されます。

空気の品質は空気質指数(AQI: Air Quality Index)値によって決められます。国家機関は空気品質要素に基づいてAQIを計算する算法を持ちます。一般的に、より低いAQI値は良い空気品質を示します。より高いAQI値はより大きな大気汚染と健康不安を示します。例えば、50のAQI値は公衆衛生に影響を及ぼす小さな可能性を持つ良い空気品質を表す一方で、300を超えるAQI値は危険な空気品質を表します。100のAQI値は汚染物質に対して一般的な空気品質標準に対応し、これは環境保護庁(EPA)が公衆衛生を保護するために設定した水準です。100未満のAQI値は一般的に満足と考えられます。或る敏感な人々の群に対して、空気品質はAQI値が100を超える場合に不健康で、AQIが151を超える場合に全ての人に対して不健康です。より多くの詳細については「[9. 参考資料](#)」で「[環境保護庁による大気質指標の指針](#)」を参照してください。

目次

序説	1
屋外と室内の空気品質の概要	1
1. 室内空気品質監視器概要	4
2. ハードウェア概要	5
2.1. AVR-IoT WG開発基板	6
2.2. MikroElektronikaのClick基板と感知器	7
2.3. 5V電力供給用にmikroBUSヘッダを変更	8
2.4. AQM応用で使われるATmega4808の特徴	8
3. ファームウェア概要	10
3.1. ファームウェア構成部品	10
3.2. AQM応用ファームウェア	11
4. ファームウェア開発	13
4.1. ソフトウェア道具	13
4.2. ファームウェアの構成設定と生成	13
4.3. マイクロコントローラ書き込み	14
5. 応用実演	14
6. メモリ要件	14
7. 電力の考察	14
7.1. 低電力の考察	14
8. 結び	15
9. 参考資料	15
10. 追補	16
10.1. AQM回路図	16
10.2. AQM要素の可視化	16
11. 改訂履歴	17
Microchipウェブ サイト	18
製品変更通知サービス	18
お客様支援	18
Microchipデバイス コード保護機能	18
法的通知	18
商標	19
品質管理システム	19
世界的な販売とサービス	20

1. 室内空気品質監視器概要

この応用記述はAVR-IoT WG開発基板、MikroElektronikaの感知器といくつかのClick基板を使って実装されるAQMを検討します。AVR-IoT開発基板はMicrochipのATmega4808マイクロコントローラ、CryptoAuthentication™安全素子(ATECC608A)、Wi-Fi単位部(ATW INC1510)が装備されます。

この応用の範囲はAVR-IoT WG開発基板の応用ファームウェア(AVR-IoT階層)を使って利用可能なハードウェア単位部と応用ファームウェアを使うAQMシステムの開発に限定されます。AQMシステムは湿度と粒子状物質(PM)の感知器を除き、感知器、EEPROM、OLEDに対してMikroElektronikaから入手可能なClick基板を使います。PM感知器と湿度感知器はPROTO Clickを使って接続されます。AQMシステムのハードウェアとファームウェアの詳細はこの文書の各々の項で記述されます。

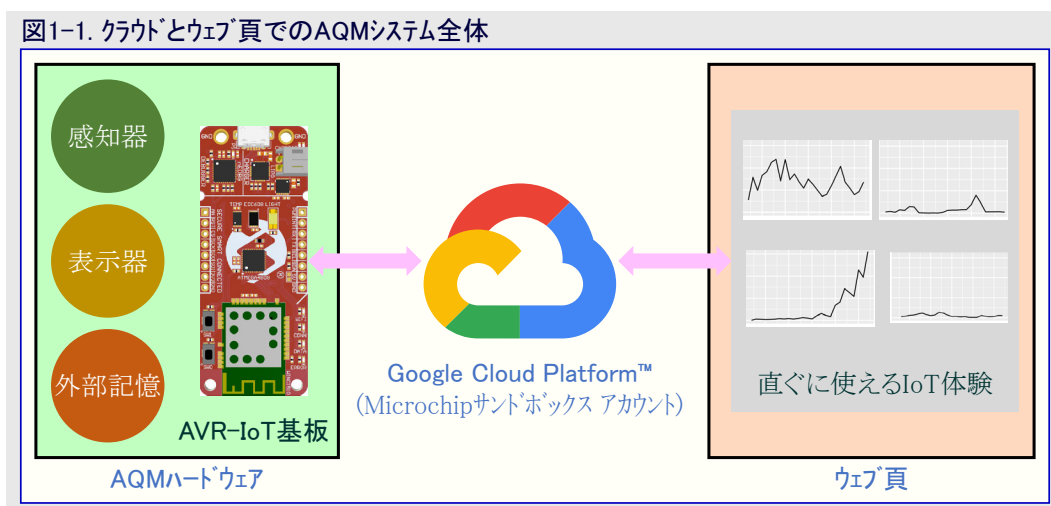
AQMはGoogleクラウドIoT核基盤で登録されたMicrochipサントボックスアカウントを使います。AVR-IoT WG開発基板はこのアカウントで通信するよう予め構成設定されています。ウェブ応用(即ち、ウェブ頁)はデータを図表として可視化するよう特にAVR-IoT WG開発基板用に設計されています。

AQMは空気品質要素を可視化するように設計されたウェブ頁(avr-iot.com)を使います。

私的Googleクラウドアカウントへの移植とウェブ応用開発はこの応用記述の範囲ではありません。より多くの情報については[AVR-IoT Googleクラウド設定](#)を参照してください。

通電後、AQMは接続するために予め構成設定されたWi-Fiルータを探します。Wi-Fiルータが利用可能なら、AQMはそれに接続してインターネットへのアクセスを得ます。Wi-Fiルータが利用できない場合、検索を続けてWi-Fi接続異常を示すために赤LEDをONにします。マイクロコントローラはPM2.5、CO₂、TVOCのような主要な気中浮遊汚染物質と共に室内環境の温度と湿度を監視します。マイクロコントローラはこれらの採取測定値を処理してPM2.5感知器の測定値からAQI値を計算します。AQIと他の採取した空気品質要素は外部EEPROMに格納され、OLEDに表示されます。

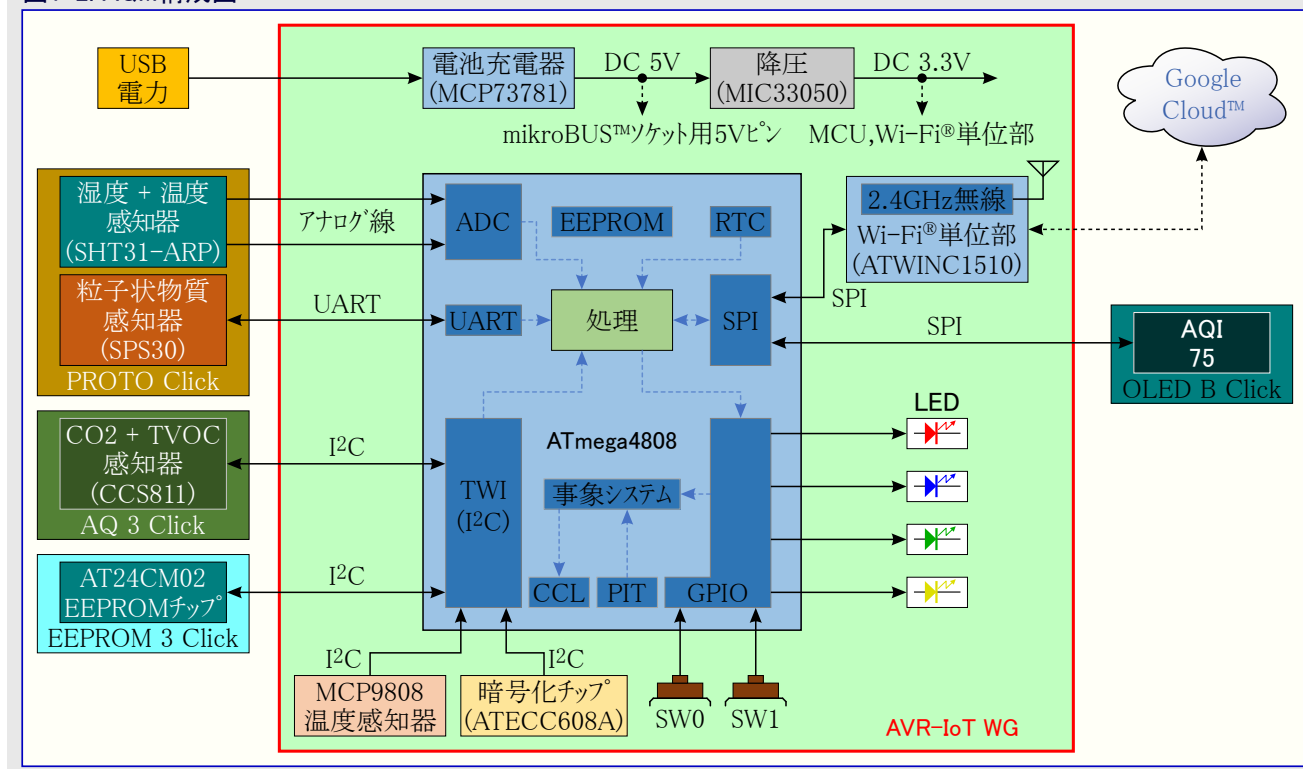
AQMがインターネット接続を見つけた場合、AQIと他の要素をGoogleクラウドにアップロードします。その後、マイクロコントローラはスタンバイ休止動作へ移行し、感知器を監視して処理したデータをクラウドへ転送するため、定期的に起き上がります。マイクロコントローラは切替器押下事象に対しても休止から瞬時に起き上がり、OLEDに空気品質要素を表示します。[図1-1](#)はクラウドとウェブ頁と共にAQMシステム全体を示します。



マイクロコントローラとGoogleクラウド間の通信はAVR-IoT WG開発基板に実装されるATECC608A安全素子によって安全にされます、使用者はAVR IoT WG基板での直ぐに使えるIoT体験のために設計されたウェブ頁を訪れることによって全ての空気品質要素を見ることができます。このウェブ頁は秒毎にGoogleクラウドからデータを引っ張って来て空気品質要素図表を更新します。

設計されたAQMのAQMシステム構成図が[図1-2](#)で示され、外部ハードウェアとの通信に必要とされ、この応用で使われるマイクロコントローラの周辺機能を強調します。

図1-2. AQM構成図



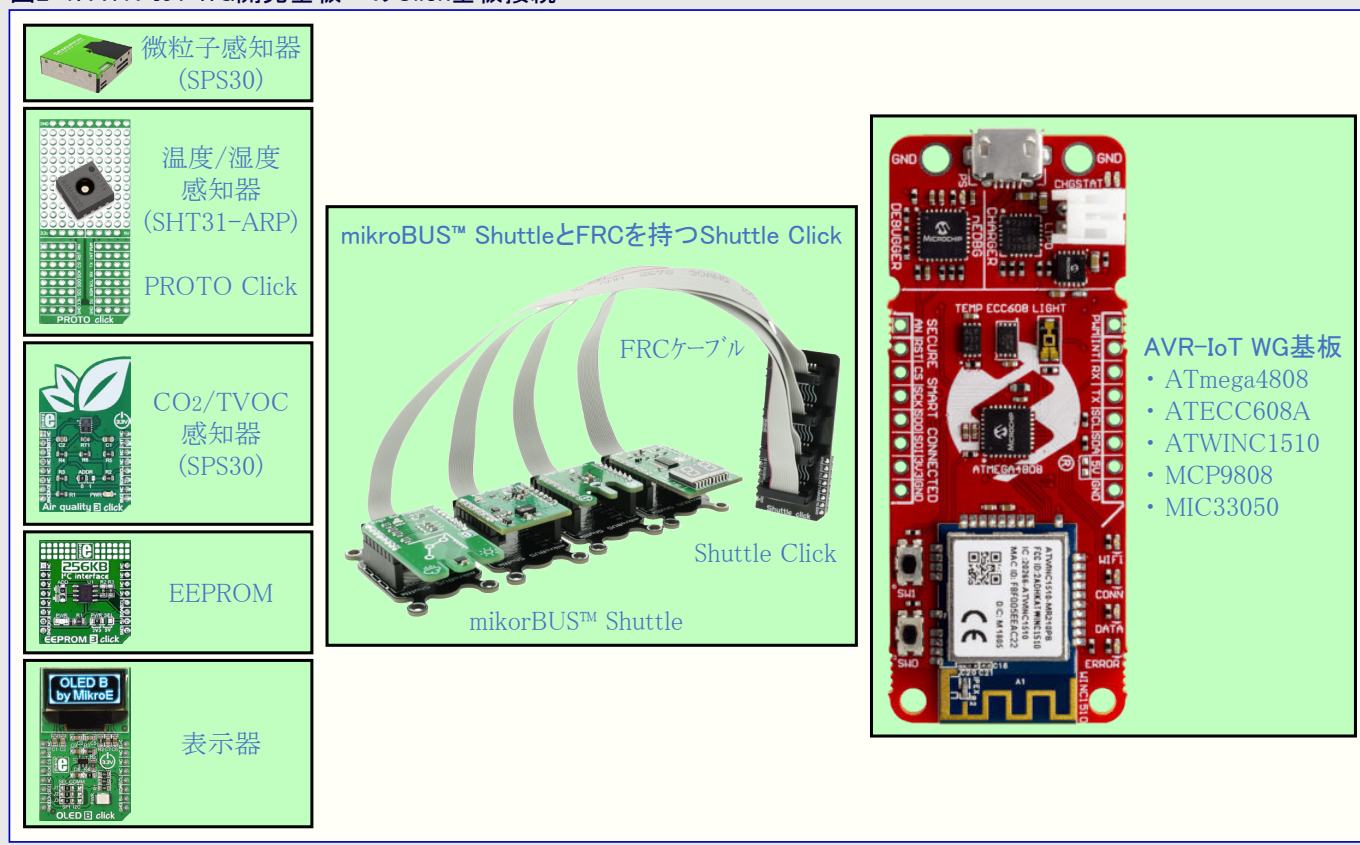
設計したAQMシステムは以下の機能を提供します。

- Microchip megaAVR®マイクロ コントローラ – CIPsと知的なアナログ周辺機能を持つATmega4808
- PM2.5、CO2、TVOC、湿度、温度の監視
- ハードウェア安全性：ATECC608A CryptoAuthentication安全素子
- 無線接続性：完全に認定されたATWINC1510 Wi-Fi単位部
- Googleクラウド接続性
- OLED表示器
- データ記録

2. ハードウェア概要

AQMハードウェアはAVR-IoT WG開発基板、MikroElektronika Click基板上に実装された感知器、外部EEPROM記憶、OLED表示器Click基板が特徴です。AVR-IoT WG開発基板は単独のmikroBUS™スロットを持ちます。図2-1.で示されるように、mikroBUSスロットを拡張するためにmikroBUS Shuttleと平型リボンケーブル(FRC)と共にShuttle Clickが使われます。mikroBUSスロットを通して感知器Click、外部EEPROM Click、表示器Clickが配置されます。

図2-1. AVR-IoT WG開発基板へのClick基板接続



AQMシステムの実装に使われるハードウェア単位部とそれらの構成部品の詳細は以降の項で網羅されます。

2.1. AVR-IoT WG開発基板

AVR-IoT WG開発基板は組み込み応用をGoogleクラウドIoT核基盤に接続する最も簡単で効果的な方法を提供する、強力な8ビットATmega4808マイクロコントローラ、ATECC608A、ATWINC1510を結合します。この基板は基板上デバッグを含み、マイクロコントローラを書いてデバッグするのに外部ハードウェアを必要としません。より多くの詳細については[AVR-IoT WG開発基板製品頁](#)を参照してください。

AQMシステムはAVR-IoT WG開発基板からマイクロコントローラ(ATmega4808)、安全素子IC(ATECC608A)、Wi-Fi単位部(ATWINC1510)、降圧調整器(MIC33050)、デジタル温度感知器(MCP9808)、機械的釦、mikroBUSコネクタを使います。以下の下位項はAVR-IoT WG開発基板の主な部品についての詳細情報を提供します。

MCU – ATmega4808

[ATmega4808](#)は48Kバイトのフラッシュメモリ、6KバイトのSRAM、256バイトのEEPROMを持ち、最大20MHzで動く8ビットAVRプロセッサを特徴とするマイクロコントローラです。このマイクロコントローラは事象システム、知的なアナログと高度な周辺機能を含み、低電力機能を持つ最新のCIPsを使います。

AQMシステムで使うATmega4808の周辺機能は次のとおりです。

- アナログ/デジタル変換器 (ADC)
- 万能同期/非同期送受信器 (USART)
- 直列周辺インターフェース (SPI)
- 2元動作主装置/従装置2線インターフェース (TWI) : I²C互換
- 実時間計数器 (RTC)
- 周期的割り込み計時器 (PIT)
- 休止制御器
- EEPROMデータメモリ
- 事象システム
- 構成設定可能な注文論理開路 (CCL)

安全素子 – ATECC608A

[ATECC608A](#)はソフトウェアの弱点に繋がる潜在的な裏口をなくす、超安全なハードウェアに基づく暗号化鍵記憶と暗号化対策を使います。ATECC608Aは安全なIoT通信に必要とされる私的と公開の鍵を格納するのに使われます。ATECC608AはI²Cインターフェースを通してホスト制御器と通信します。

無線接続性 – ATWINC1510 Wi-Fi®単位部

ATWINC1510はIEEE 802.11 b/g/n IoT制御器です。ATWINC1510 Wi-Fi単位部はATWINC1510 SoC、26MHz発振器、平衡不平衡変成器(バラン)、印刷空中線または外部空中線用マイクロ同軸(μFL)コネクタを統合します。この単位部はSPIインターフェースを通してホスト制御器と通信します。

デジタル温度感知器 – MCP9808

MCP9808デジタル温度感知器は12ビットの高い分機能と共に-20~+100°Cを0.5°Cの精度で応用の広い範囲を扱います。付加的な機能は停止、上下越え温度監視、重要な温度警報を含みます。このデジタル感知器はI²Cインターフェースを通してマイクロコントローラに接続されます。

降圧調整器 – MIC33050

MIC33050は内部インダクタを持つ高効率600mA PWM同期降圧調整器です。主な特徴は2.7~5.5Vの入力電圧範囲、600mA出力電流、20μA静止電流、低出力電圧細波(リップル)です。

2.2. MikroElektronikaのClick基板と感知器

AQMは外部ハードウェアとしてMikroElektronikaのClick基板を使います。

Shuttle Click、mikroBUS™ Shuttle、FRC

Shuttle Clickは単独のmikroBUSで4つまでのClick基板を積み重ねるための容易な解決策を提供するmikroBUSソケット拡張基板です。1×4拡張のためにShuttle Clickと共に**mikroBUS Shuttle**と**FRC**が使われます。AQMではShuttle ClickがAVR-IoT WG開発基板上に置かれ、4つのmikroBUS ShuttleはFRCケーブルを使ってShuttle Clickに接続されます。

湿度とPMの感知器インターフェース用PROTO Click

PROTO ClickはmikroBUS外形規格での付加用基板です。10×11の試作領域と追加の電力パッドが特徴です。独自電子回路組み立てや独自Click基板作成に使うことができます。PROTO Clickはこれらの感知器が利用できないため、アナログ出力の湿度感知器とマイクロコントローラ付きPM感知器を接続するのに使われます。

・PM感知器単位部

Sensirionの**SPS30**感知器は空気品質監視と管理用の光学粒子状物質感知器です。AQMはこの感知器単位部を使ってPM2.5を監視します。この監視器はマイクロコントローラと通信するためにUARTインターフェースを持ちます。

・湿度感知器

SHT31-ARPは完全に校正、直線化され、温度補償されたアナログ出力湿度/温度感知器です。これはマイクロコントローラのADC周辺機能に接続されます。AQMはこの感知器単位部を使って湿度を監視します。

注: 温度測定に対して、AQMはAVR-IoT WG開発基板上に実装されたMCP9808デジタル感知器を使います。

SHT31-ARP感知器ICの外囲器はDFN外囲器です。このICはDFN-9からDIP-8変換基板を使ってPROTO Clickに実装されます。DFN-8からDIP-8変換基板とPROTO ClickのmikroBUSコネクタ間のピン接続は図2-2.で示されます。PM感知器(SPS30)は独立した単位部で5ピンのコネクタを持ちます。SPS30とPROTO ClickのmikroBUSコネクタ間のピン接続は図2-2.で示されます。より多くの詳細については表2-1.を参照してください。

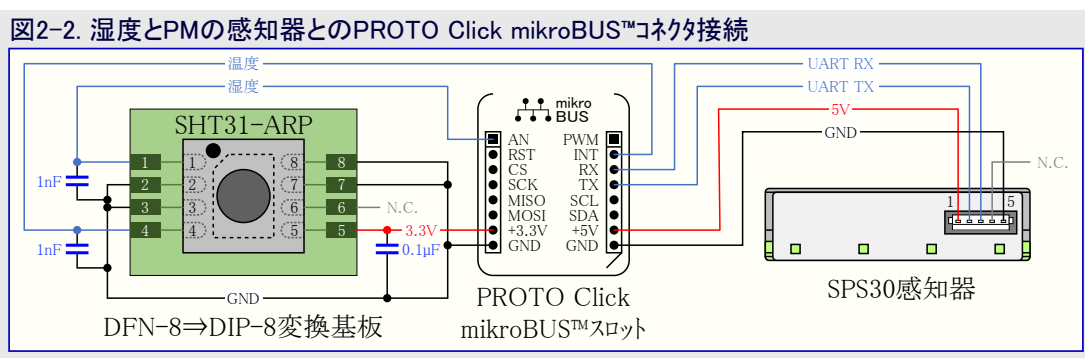


表2-1.は使った湿度とPMの感知器のPROTO ClickのmikroBUSコネクタに接続されるピンを示します。

表2-1. SHT31-ARPとSPS30の感知器とのmikroBUS™ピン コネクタ

SHT31-ARP	PROTO ClickのmikroBUS™コネクタ		SHT31-ARP	SPS30
1 (湿度)	AN	PWM		
	RST	INT	4 (温度)	
	CS	RX		3 (TX)
	SCK	TX		2 (RX)
	MISO	SCL		
	MOSI	SDA		
5 (VDD)	3.3V	5V		1 (5V)
2,3,7,8 (GND)	GND	GND		5 (GND)

Air Quality 3 Click

AQMはTVOCと等価CO₂(eCO₂:equivalent CO₂)測定用にAir Quality 3 Clickを使います。二酸化炭素換算はそれらの地球温暖化係数に基づいて様々な温室効果ガスの放出を比較するのに使われる尺度です。Air Quality 3 Clickは広範囲の揮発性有機化合物(VOC)とCO₂を検出する金属酸化物(MOX)ガス感知器を統合する超低電力デジタル ガス感知器解決策であるCCS811が装備されます。このClickはI²Cインターフェースを通してマイクロ コントローラに接続されます。

OLED B Click

OLED B Clickは96×39ピクセル青単色受動マトリクスOLED表示器を搭載します。表示器を駆動するのにSSD1306制御器を持ちます。OLED B ClickはSPIを通してマイクロ コントローラと通信します。

EEPROM 3 Click

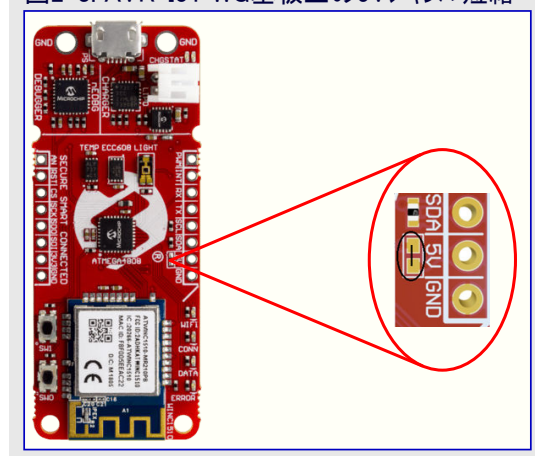
EEPROM 3 Clickは256Kバイトの電氣的消去可能で書き込み可能な読み込み専用メモリを提供します。使われるEEPROM単位部はAT24CM02で、I²C直列EEPROMです。AT24CM02の鍵となる特徴の1つは誤り検出と修正の仕組み(EDC)で、これは4バイトの群に対して内部的に割り当てられた追加6ビットを利用することによって誤り修正を許します。この保護の仕組みはいくつかの形式のビット誤りを修正することができ、最終使用者には気付かないままです。ビット比較と誤り修正は内部的に行われます。このClickはI²Cインターフェースを通してマイクロ コントローラに接続されます。

2.3. 5V電力供給用にmikroBUSヘッダを変更

SPS30感知器は動作するのにDC 5Vを必要とします。mikroBUSヘッダでSPS30感知器を使うため、ハードウェア変更が必要とされます。既定で5V供給はmikroBUSヘッダに接続されません。ヘッダに対して5Vを許可するため、0Ω抵抗を半田付けすることによって図2-3.で示されるジャンパを短絡してください。

注: AQM回路図と接続については「10. 追補」章を参照してください。

図2-3. AVR-IoT WG基板上の5Vジャンパ短絡



2.4. AQM応用で使われるATmega4808の特徴

本項では、マイクロ コントローラの特徴とAQM応用で使われる周辺機能構成設定が記述されます。

ADC

ATmega4808のADCは8ビット分解能で150ksp/sまたは10ビット分解能で115ksp/sの最大変換速度に達することができます。組み込み雑音濾波機能を持ちます。ADCによって支援される雑音対策は次のとおりです。

- ハードウェア採取累積器
- 採取遅延
- 自動採取遅延変動(ASDV:Automatic Sampling Delay Variation)

AQMで、ADCは10ビット分解能、(採取間固定遅延の)8採取でのハードウェア採取累積器で構成設定されます。ADCはVDD(マイクロ コントローラ入力電源)のADC電圧参照基準に対して湿度感知器(SHT31-ARP)の電圧出力を採取します。

USART

USART周辺機能はPM感知器(SPS30)との通信に使われます。USART1はPM2.5感知器と接続するために115200のボーレート、パリティビットなし、1停止ビットで構成設定されます。

SPI

AQMはATWINC1510 Wi-Fi装置と表示器(OLED B Click)と通信するのにSPIを使います。SPIのデータクロック周波数は2.5MHz、動作形態0で動きます。

I2C

AQMはATECC608A暗号化チップ、外部記憶(EEPROM 3 Click)、デジタル温度感知器(MCP9808)、TVOCとCO2感知器(Air Quality 3 Click基板)と通信するのにI2C互換のWTIを使います。TWIは100kHzのデータクロック周波数で構成設定されます。

休止制御器

ATmega4808マイクロコントローラは3つの休止動作(アイドル、スタンバイ、パワーダウン)を支援します。AQMはスタンバイ休止動作を使います。この動作で使用者は各々、スタンバイ時走行(RUNSTBY)ビットを使って休止期間の間に動くように周辺機能を構成設定することができます。AQMでは切替器押下を検出するためにスタンバイ休止動作の間にCCLが許可されます。

RTC

AQMはCPUの活動期間中に1msの周期的な割り込みを生成するのにRTC単位部を使います。1ms周期は作業計画のためファームウェアによって使われます。詳細については「[3. ファームウェア概要](#)」を参照してください。

PIT

これはRTC周辺機能の一部です。これは独立して許可することができ、RTCと同じクロック元を使います。AQMでPITはRTCクロックを使って2秒の周期的割り込みを生成するように構成設定されます。PITは全ての休止動作で動きます。従って、AQMで定期的にスタンバイ休止動作からマイクロコントローラを起き上がらせるのに使われます。

事象システム

事象システムは直接周辺機能間で合図するための系です。AQMは事象システムの2つのチャンネルを使います。GPIO(PF6)は事象チャンネル1を通してCCLのLUT1の入力1に接続されます。PIT出力3は事象チャンネル4を通してCCLのLUTの入力2に接続されます。この構成設定で事象システムは(AVR-IoT WG開発基板上に実装された)切替器SW0入力信号の跳ね返り除去に使われます。より多くの詳細については「事象システム、CCL、PITを使う切替器跳ね返り除去実装」を参照してください。

CCL

CCLはデバイスのピン、事象、または他の内部周辺機能に接続することができる設定可能な論理回路周辺機能です。CCL周辺機能はAQMで事象システムとPITの手助けで切替器の跳ね返り除去の処理に使われます。切替器の跳ね返り除去の設計と実装の詳細は「事象システム、CCL、PITを使う切替器跳ね返り除去実装」で詳述されます。

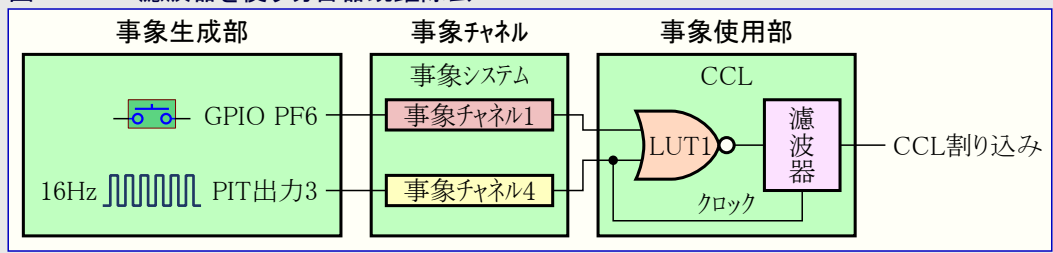
EEPROMデータメモリ

ATmega4808は256バイトのEEPROMが特徴です。AQMはマイクロコントローラの内部EEPROMを要素(既定構成設定要素、外部EEPROM)データ記憶指標)の格納に使います。

事象システム、CCL、PITを使う切替器跳ね返り除去実装

切替器跳ね返り除去はどのソフトウェア介入もなしに事象システム、CCL、PITを使って実装されます。釐が押されるまたは開放される時毎にHighとLow間を度々何回か遷移する機械的な釐からの信号が跳ね返りとして参照されます。この信号を使って一度だけ釐が押されるまたは開放される事象を生成するため、いくつかの濾波の形式がハードウェアまたはソフトウェアのどちらかで実装されることが必要で、跳ね返り除去としても参照されます。切替器信号の跳ね返り除去は図2-4.で示されるようにCCLでそれを濾波することによって達成され、切替器押下事象に対して割り込みを生成するのに濾波された信号を使います。

図2-4. CCL濾波器を使う切替器跳躍除去

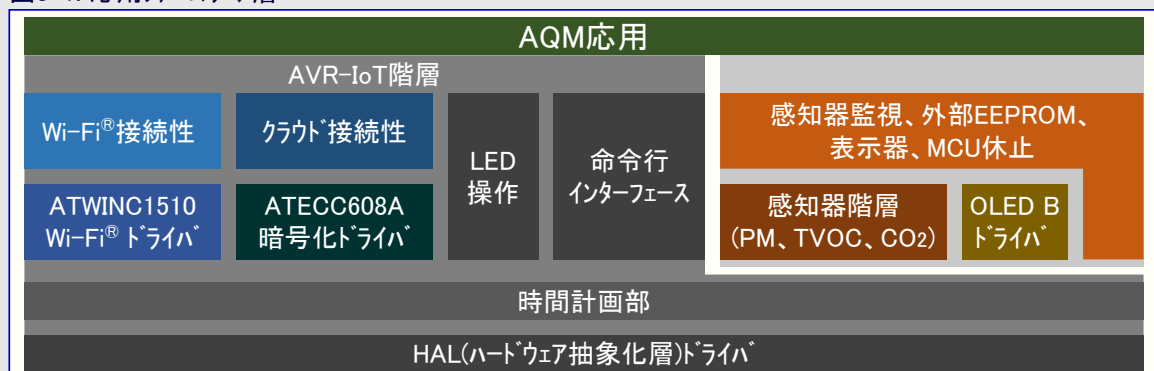


濾波器は動作するために適切なクロック周波数を必要とします。2クロック周期よりも短いLUTからのどの出力も濾波されます。この応用でPIT出力3はクロック元(周波数:16Hz)として使われます。信号は事象システム経由で配線されます。事象チャンネル1は切替器信号を配線するのに使われ、事象チャンネル4はLUTの事象入力へクロックを配線するのに使われます。従って、GPIOとPITは事象生成部として働き、CCLは事象使用部として働きます。より多くの詳細については「[AN2451:AVRのコアから独立した周辺機能での開始に際して](#)」応用記述を参照してください。

3. ファームウェア概要

本章は室内空気品質監視器のファームウェア実装詳細を説明します。AQM応用ファームウェアはAVR-IoT階層を通して開発されています。AVR-IoT階層についてより多くの詳細に関しては[AVR-IoT WG開発基板](#)とその資料を参照してください。図3-1はAVR-IoT階層と応用ファームウェア単位部を示します。

図3-1. 応用ファームウェア層



3.1. ファームウェア構成部品

3.1.1. AVR-IoT階層

AVR-IoT階層はAtmel STARTとMCCの構成部ツールの手助けで生成されたファームウェアライブラリです。これはAVR-IoT WG開発基板を使って直ぐに使えるIoT体験のために独自化されて構成設定されています。

AVR-IoT階層は1msの計画化刻時で独自の時間計画部を使います。計画化刻時を生成するのにRTCが使われます。使用者は作業の計画頻度と共に計画部待ち行列に対して作業(タスク)の追加と削除を行うことができます。Wi-Fi接続、安全クラウド接続、LED表示がAVR- IoT階層の一部です。

Wi-Fi単位部との通信はWi-Fi作業によって処理されます。この作業はWi-Fi単位部の初期化、準備、Wi-Fiルータ接続、データ送信を扱います。

Googleクラウドとの安全な通信はクラウド作業によって扱われます。この作業はクラウド接続状態を更新します。接続が失われた場合に再接続を試みます。

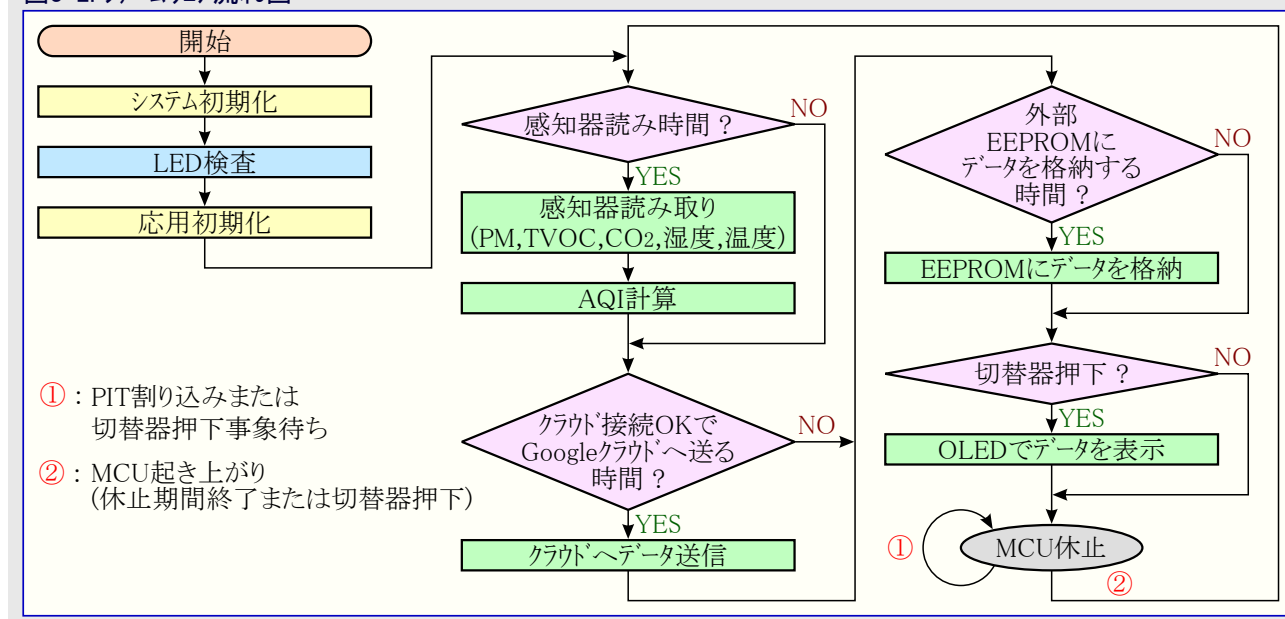
AQMファームウェアは以下のAVR-IoT階層版を使います。

- Atmel START用AVR-IoT階層 : 1.1.1
- MCC用AVR-IoT階層 : 1.2.0

3.1.2. AQM応用コード

応用ファームウェアは感知器からデータを定期的に採取して採取したデータを処理します。AQIを計算して処理したデータをGoogleクラウドに送ります。更に、処理したデータはOLED表示器で表示され、データ記録のために外部EEPROMに格納されます。図3-2は応用概要の流れ図を示します。

図3-2. ファームウェア流れ図



3.2. AQM応用ファームウェア

3.2.1. 初期化

ファームウェア実行はマイクロコントローラとその周辺機能の初期化で始まります。AQM応用はSPI、I²C、USART、ADC、デジタル入出力、事象システム、CCL、RTC、PITのようなマイクロコントローラ周辺機能を使います。AQMでは休止機能も許可されます。システムは以下の構成設定で初期化されます。

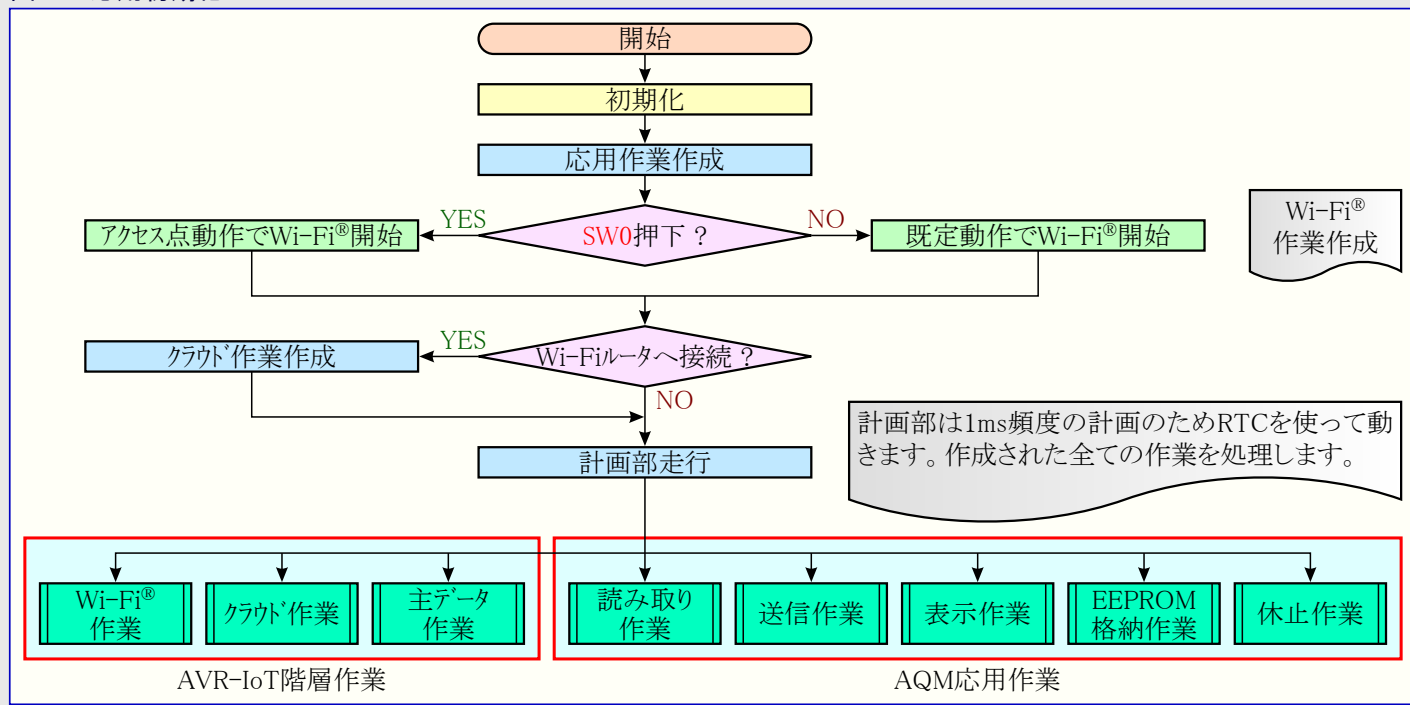
- SPI : SPIデータクロック(2.5MHz)、SPI動作種別(MODE0)
- I²C : I²Cデータクロック(100kHz)
- USART1 : ボーレート(115200)、パリティビット(なし)、停止ビット(1)
- USART2 : ボーレート(9600)、パリティビット(なし)、停止ビット(1)
- ADC : 分解能(10ビット)、採取周波数(48kHz)と固定遅延での8採取累積
- RTCは1ms毎に割り込みを生成するように構成設定され、PITは2秒ごとに割り込みを生成するように構成設定されます。
- 事象システムとCCLの濾波器付きLUT1は切替器跳ね返り除去に使われます。
- LEDとSPI従装置選択(SS)用GPIOを出力として設定
- SW0とSW1用GPIOを入力として設定
- 休止制御器 : スタンバイ休止動作が許可されます。CCL周辺機能がスタンバイ休止動作で動くように構成設定され、CCL割り込みが休止からマイクロコントローラを起き上がらせませす。PITもスタンバイ休止動作で動き、PIT割り込みも休止からマイクロコントローラを起き上がらせませす。

AQMファームウェアはAVR-IoT階層上で開発され、周辺機能初期化後、応用作業(タスク)が作成されます。ファームウェア実行(作業計画)はCPUの活動期間中に起きます。以下はAQM応用ファームウェア作業です。

- **READ_Task()** : 感知器からの測定値とAQI計算を処理
- **DISPLAY_Task()** : OLED B Click上でのAQM要素表示を処理
- **SEND_Task()** : GoogleクラウドへのAQM要素アップロードを処理
- **STORE_Task()** : 外部EEPROMでAQM要素格納を処理
- **SLEEP_Task()** : マイクロコントローラの休止と起き上がりを処理

図3-3は応用初期化の流れ図です。

図3-3. 応用初期化



「3.2.2. 応用作業」はそれらの担当と共にAQM応用ファームウェア作業を記述します。

3.2.2. 応用作業

感知器読み取り

この作業はPM感知器とAQ3 Clickの初期化を扱います。全ての感知器(PM、CO₂、TVOC、温度、湿度)データを読んでPM2.5測定値に基づいてAQIを計算します。感知器の読み取りは定期的に(4秒毎に1度)行われます。

マイクロ コントローラと感知器の接続詳細とそれらのデータ採取情報は次のとおりです。

・ 温度感知器

マイクロ コントローラはI²Cを通してデジタル温度感知器(MCP9808)と接続されます。`SENSORS_getTempValue()`関数はMCP9808感知器から温度値を読み取ります(MCP9808のI²Cアドレスは\$18です)。

・ 湿度感知器

湿度感知器(SHT31-ARP)はアナログ電圧出力を持ち、従ってADC周辺機能を通してマイクロ コントローラと接続されます。ADC周辺機能は48kHzで湿度感知器の出力を採取するように構成設定されます。ADCは固定遅延でハードウェア採取累積器を使うことによって採取した信号を濾波します。`ADC0_GetConversion()`関数は感知器(SHT31-ARP)から湿度値を得ます。

・ TVOCとeCO₂感知器

Air Quality 3 ClickはCCS811感知器を持ち、TVOCと等価二酸化炭素換算(eCO₂)を測定します。これはI²Cを通してホスト マイクロ コントローラと通信します。`ccs811_GetResults()`関数はAir Quality 3 ClickからTVOCとCO₂を読み取ります(Air Quality 3 ClickのI²Cアドレスは\$5Aです)。

注: CCS811感知器データシートに従い、感知器は慣らし運転のため初回48時間、その後感知器が使われる毎に望む動作形態で20分動かすことが推奨されます。これら20分間、使用者はTVOCに対して0とeCO₂に対して400として一定の値を観測するかもしれませんが。応用ファームウェアでは48時間の慣らし運転時間と20分の遅延は扱われません。AQMでは電源再投入後20分までTVOCとCO₂が正確でないかもしれません。

・ PM2.5感知器

マイクロ コントローラはUARTインターフェースを通してPM感知器(SPS30)と通信します。SPS30感知器からのデータはPM10、PM0.5、PM1.5、PM2.5のデータを含みます(PMは粒子状物質の略、数値はμmでの塵の大きさを記述します)。室内AQMはPM2.5データだけを使います。`sps30_read_measurement()`関数はPM感知器(SPS30)からPM2.5値を読み取ります。

PM2.5値読み取り後、ファームウェアはPM2.5測定値に基づいてAQIを計算します。AQI値は空気品質を報告するための指数です。50よりも低い周囲空気のAQI値が良い空気品質と見做されます。

この応用は[米国環境保護庁](#)によって提供されるAQI計算式を使います。

AQI計算式:

$$I = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} \times (C - C_{low}) + I_{low}$$

ここで、

I = AQI

C = 汚染濃度

C_{low} = ≤Cである汚染中止点

C_{high} = ≥Cである汚染中止点

I_{low} = C_{low}に対応する指数中止点

I_{high} = C_{high}に対応する指数中止点

AQIについてのより多くの詳細を[空気質指数\(AQI:Air Quality Index\)-EPA](#)で見つけてください。

PM2.5平均計算:

AQI計算は過去12時間に対するPM感知器の時間毎のデータを必要とします。AQM応用ファームウェアは過去12時間値の平均を取るために[AirNow](#)によって提供される方法を実装します。

平均PM2.5計算方法

- 最後の12時間に渡ってPM2.5汚染範囲(最大と最小)を比較してください。
- 尺度調整した変化率を得るために12時間期間での最大汚染で範囲を除算してください。
- 1から尺度調整した割合を引くことによって重み係数を計算してください。重み係数は0.5～1の間でなければなりません。最小限度は3時間平均を近似します。重み係数が0.5未満の場合、値を0.5に制限してください。
- 重み係数の濃度測定時点からの経過時間乗を各時間毎の濃度に乗算してください(現在の時間の場合、係数は0乗されます。)
- それらの積を合計して重み係数の濃度測定時点からの経過時間乗の合計で除算することによって平均PMを計算してください。

注: この実演は時間毎の感知器測定値を取りません。実時間データの実演については全ての感知器が4秒ごとに測定されています。使用者は感知器測定周期を1時間に構成設定することができます。

空気品質要素表示

この作業はAVR-IoT WG開発基板のSW0が押された時に空気品質要素を表示します。SW0切替器押下事象後、空気品質要素を順次OLEDで表示します。各空気品質要素は概ね4秒間OLED画面に留まり、その後次の要素が表示されます。OLED上の空気品質要素を直ぐに変更するにはSW0切替器を押してください。全てのAQM要素表示後、OLED表示はOFFになります。再び切替器が押されたなら、OLEDはONになり、空気品質要素の表示を始めます。

クラウドへデータ送出

この作業はGoogleクラウドを通してAQMデータをアップロードします。AQMデータのアップロードはクラウド接続が利用可能なら、定期的に(4秒毎に1度)行われます。AVR-IoT階層はマイクロコントローラとGoogleクラウド間の接続を処理し、この作業はGoogleクラウドへの要素アップロードを処理します。AQM応用ファームウェアはGoogleクラウドへデータを配信(アップロード)するのにメッセージキューイングテレメトリトランスポート(MQTT:Message Queuing Telemetry Transport)規約を使います。データは次のようなJSONオブジェクトを通して感知器からクラウドへ転送されます。次のように形式化されるASCII文字列、{ 'AQI': XXX, 'Temp': YYY, 'RH': XXX, 'PM': YYY, 'TVOC': XXX, 'CO2': YYY }, ここでXXXとYYYは10進表記で表された数値です。

注: 1. AVR-IoT WG開発基板ウェブページで、図表は要素の名前とその値を使うことによって構築されます。

2. JSONは全ての最近のブラウザで支援される簡素な階層データ直列化構文です。この形式は人の可読性を残すと同時に軽量のオブジェクト表現の方法にします。

応用ファームウェアは外部EEPROMにデータを格納しています。この作業はAQMが送るべき古いデータを持っているか(クラウド接続なしの間)に外部EEPROMに格納されたデータも調べます。最初に古いデータをアップロードしてその後実時間データをアップロードします。

外部EEPROMへのデータ記憶

この作業は外部記憶(EEPROM 3 Click)にAQMデータを格納します。I2Cインターフェースの手助けで外部記憶をアクセスして外部記憶上に空気品質要素(AQI、PM2.5、CO2、TVOC、湿度、温度)を格納します。AQMデータを定期的(即ち、1分毎に)格納します。

MCU休止

この作業はマイクロコントローラの休止周回を担当します。全ての作業の完了後、この作業はsleep()命令を呼んでマイクロコントローラを構成設定されたスタンバイ休止動作に置きます。sleep()命令を呼ぶ前にマイクロコントローラの主発振器を16/20MHz(OSC20M)から32.768kHz超低電力(OSC32K)に切り替えます。マイクロコントローラが休止から起き上がると、主発振器をOSC20Mに切り替え戻します。

AQMではマイクロコントローラがPIT割り込みとCCL割り込みの2つの起き上げ元を使っています。PIT割り込みは定期的に(2秒毎に1度)マイクロコントローラを休止から起き上がらせます。SW0切替器押下事象もマイクロコントローラを休止から起き上がらせることができます。

4. ファームウェア開発

4.1. ソフトウェア道具

ファームウェア開発にAtmel StudioとMPLAB X IDEが使われます。

Atmel Studioを使ってファームウェアを開発するためのツールチェーン

- Atmel Studio 7 (Ver. 7.0.2397)
- AVR GCCコンパイラ (Ver. 5.4.0)
- Atmel START構成部ツール (Ver. 1.7.279)

MPLAB X IDEを使ってファームウェアを開発するためのツールチェーン

- MPLAB X IDE (Ver. 5.35)
- AVR GCCコンパイラ (Ver. 5.4.0)
- MPLABコード構成部 (Ver. 3.95.0)

注: 実演を動かすにはインストールされた道具の版が同じかそれ以降でなければなりません。この例は以前の版で検査されていません。

4.2. ファームウェアの構成設定と生成

ファームウェアは下のようGitHubで、それとAtmel START例で入手可能です。



GitHubでコード例を見てください (Atmel Studio)。
貯蔵庫を開覧するにはクリックしてください。



GitHubでコード例を見てください (MPLAB® X)。
貯蔵庫を開覧するにはクリックしてください。

応用ファームウェアはAtmel STARTまたはMCCを使って生成することができます。

Atmel STARTまたはMCC枠組みを使ってファームウェアを生成する手順についてのより多くの詳細に関しては「AN3417 - 室内空気品質監視器:Atmel STARTとMPLAB®コード構成部(MCC)を使うファームウェア作成」を参照してください。

4.3. マイクロ コントローラ書き込み

マイクロ コンピュータに応用ファームウェアを書くには「[AVR-IoT WG開発基板使用者の手引き](#)」を参照してください。

5. 応用実演

ハードウェア構成、ハードウェア接続、動作手順、LED表示、AVR-IoT WG基板のWi-Fi単位部の準備、クラウドを通すAQMデータの可視化については「[室内空気品質監視器使用者の手引き](#)」を参照してください。

AQM回路図とウェブ頁でのAQM要素の可視化については「[10. 追補](#)」を参照してください。

6. メモリ要件

Atmel StudioとMPLAB X IDEでの応用ファームウェアのプログラムとデータのメモリ要件は下で与えられるとおりです。

表6-1. Atmel Studio 7(Ver. 7.0.2397)でのメモリ要件

最適化	プログラム メモリ	データ メモリ
-Os	44416 (90.4%)	2781 (45.3%)

表6-2. MPLAB® X IDE(Ver. 5.35)でのメモリ要件

最適化	プログラム メモリ	データ メモリ
-Os	47272 (96.2%)	2771 (45.1%)

7. 電力の考察

AVR-IoT基板はUSBポート(DC 5V)によって給電されます。この基板はマイクロ コントローラとPM感知器を除く他の外部ハードウェア用のVDDとして使われる3.3Vを生成するためのMIC33050降圧変換器が装備されます。PM感知器はAVR-IoT WG基板で5Vジャンパを短絡することによって与えられるDC 5V供給を必要とします。

AQMの電力消費データはマイクロ コントローラが活動動作で動いている間に捕獲されます。

注: 電流は降圧変換器(DC 3.3V)の後で測定されます。

表7-1. 活動動作のDC 3.3V供給での総電流消費

AQMでの部品	代表的な電流消費 (mA)
外部感知器ハードウェア(PM感知器を除く)	29
AVR-IoT基板	96
合計	125

表7-2. 活動動作のDC 5Vジャンパでの
総電流消費(PM感知器のみ)

AQMでの部品	代表的な電流消費 (mA)
SPS30感知器単位部	50

注: この応用は既存のハードウェアClick基板を使います。スタンバイ休止動作はマイクロ コントローラだけに実装されます。他の全てのClick基板とWi-Fi単位部は常にONです。実演目的のため、感知器データは4秒毎にGoogleクラウドにアップロードされます。ウェブ頁仕様に従い、装置は4秒毎にデータを送ります。

更に電力消費はWi-Fi単位部と感知器ClickをOFFにすることによって減らすことができます。

7.1. 低電力の考察

AQMの電流消費は、それが入手可能なハードウェア単位部(AVR-IoT WG開発基板とMikroElektronikaのClick)を使って構築されるため、代表的なIoT感知器節点よりも高いです。この電流消費はAQMSシステムを構築するのに独自化したハードウェアが使われたなら、数 μ Aに減らすことができます。これはマイクロ コントローラの発振器を超低電力に切り替え、マイクロ コントローラとWi-Fi単位部を休止状態に置き、感知器の電源を制御することによって達成することができます。システム電力は感知器読み取り、EEPROM書き込み、データアップロードの頻度を減らすことによって更に減らすことができます。

表7-3. マイクロ コントローラとWi-Fi単位部が休止状態の時の
AQMIによる電力消費

AQMでの部品	代表的な電流消費 (mA)
Shuttle Clickと感知器Click接続でのAQMI(マイクロ コントローラとWi-Fiは休止)	約29
SPS30感知器単位部 (DC 5V供給)	50

表7-4. マイクロ コントローラとWi-Fi単位部が休止状態の時の
(接続されたハードウェアなしでの)AQMIによる電力消費

AQMでの部品	代表的な電流消費 (mA)
Shuttle Click接続なしでのAQMI(マイクロ コントローラとWi-Fiは休止)	約200

ATmega4808マイクロ コントローラの電流消費を測定するには、ATmega4908とATmega4809の両方共同システムに属するため、ATmega4809 Xplained Pro基板が使われています。マイクロ コントローラはAQMFarmウェアが書かれています。電流読み取りについてはPowerデバッグとでデータ可視器(Data Visualizer)が使われています。

表7-5. スタンバイ休止動作でのATmega4808/9マイクロコントローラによる電流消費の例

転化基板	ATmega4809 Xplained Pro
動作電圧	DC 3.3V
休止動作	スタンバイ休止動作
休止中に動く周辺機能	PIT、CCL
活動動作での電流 (OSC20M発振器)、10MHzで動く主クロック	4.8mA
休止動作での電流 (OSC20M発振器)、10MHzで動く主クロック	1.6mA
休止動作での電流 (OSCULP32K発振器)、32.768kHzで動く主クロック	約200μA

低電力消費の設計を達成する方法のより多くの情報については「AN1416:低電力設計の手引き」と「AN2515:AVR®低電力技法」の応用記述を参照してください。

8. 結び

この応用記述はATmega4808を特徴とするAVR-IoT WG開発基板とMikroElektronikaの感知器といくつかのClick基板を使うAQM解決策の実装詳細を網羅します。AQMシステムを実現するためのATmega4808マイクロコントローラの事象システム、CCL、知的なアナログ周辺機能のようなCIPsの使い方も強調します。

組み込み設計は各装置の認証を扱うATECC608A CryptoAuthentication™安全素子で安全にすることができます。無線接続性はWi-Fi単位部(ATWINC1510)で設計されるため継ぎ目なしで追加することができます。

9. 参考資料

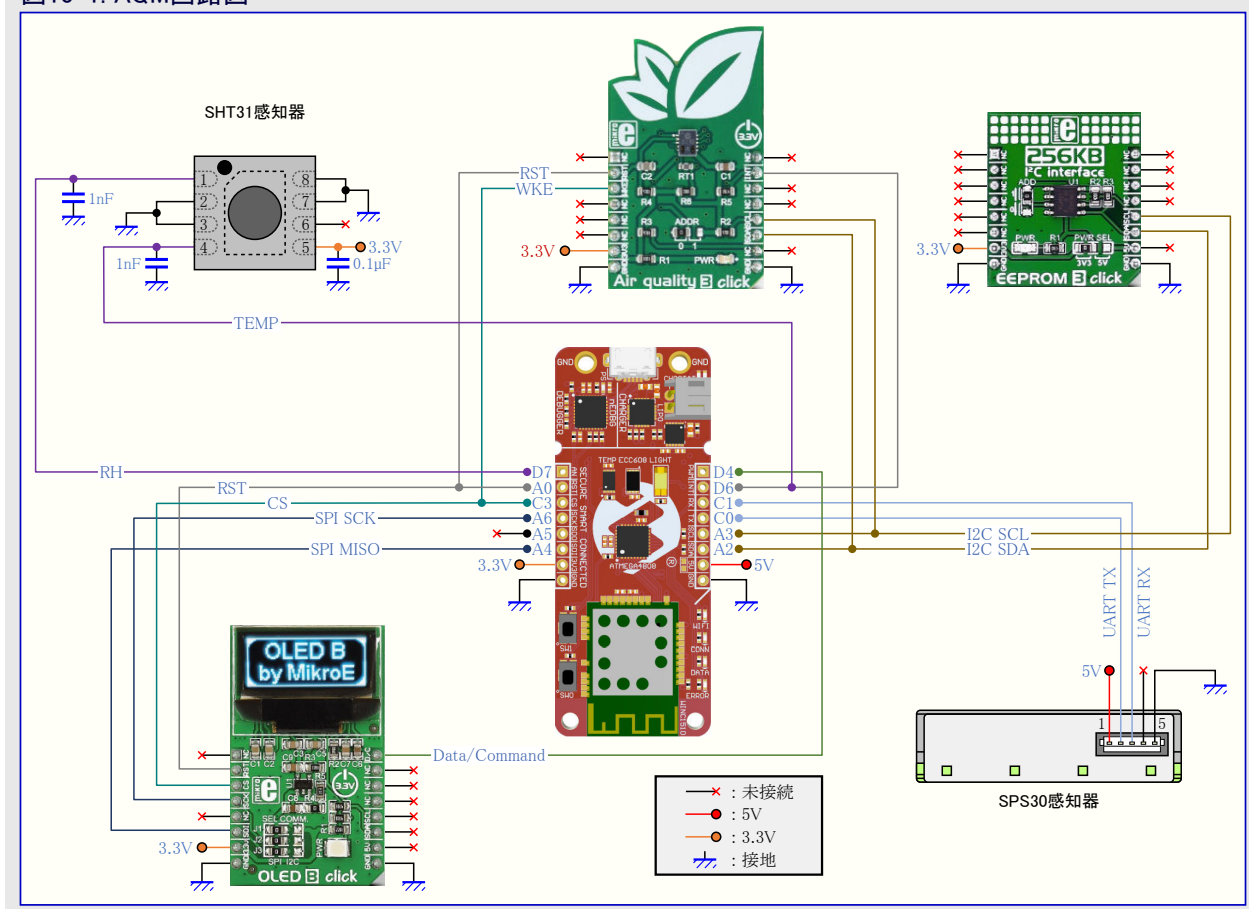
1. 大気質指数 - 大気質への手引きと健康指針: https://www3.epa.gov/airnow/aqi_brochure_02_14.pdf
2. AQI計算機: <https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.calculator>
3. ATmega4808製品頁: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATMEGA4808>
4. ATmega4809製品頁: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATMEGA4809>
5. CIPs紹介: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Getting-Started-with-Peripherals-on-AVR-MCU-00002451C.pdf>
6. ADC応用に対する雑音対策: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN2551-Noise-Countermeasures-for-ADC-Applications-00002551C.pdf>
7. AVR-IoT WG開発基板でのGoogleクラウドIoT用賢く安全な節点作成: <https://www.microchip.com/design-centers/internet-of-things/google-cloud-iot/avr-iot>
8. AVR-IoT WG開発基板使用者の手引き: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/AVR-IoT-WG-Development-Board-User-Guide-50002809B.pdf>
9. 家庭の空気汚染と健康: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

10. 追補

10.1. AQM回路図

全ての外部ClickはAVR-IoT WG開発基板の単独のmikroBUSコネクタに接続されます。図10-1はAQM回路図詳細を示します。ここでShuttle Clickは示されません。

図10-1. AQM回路図

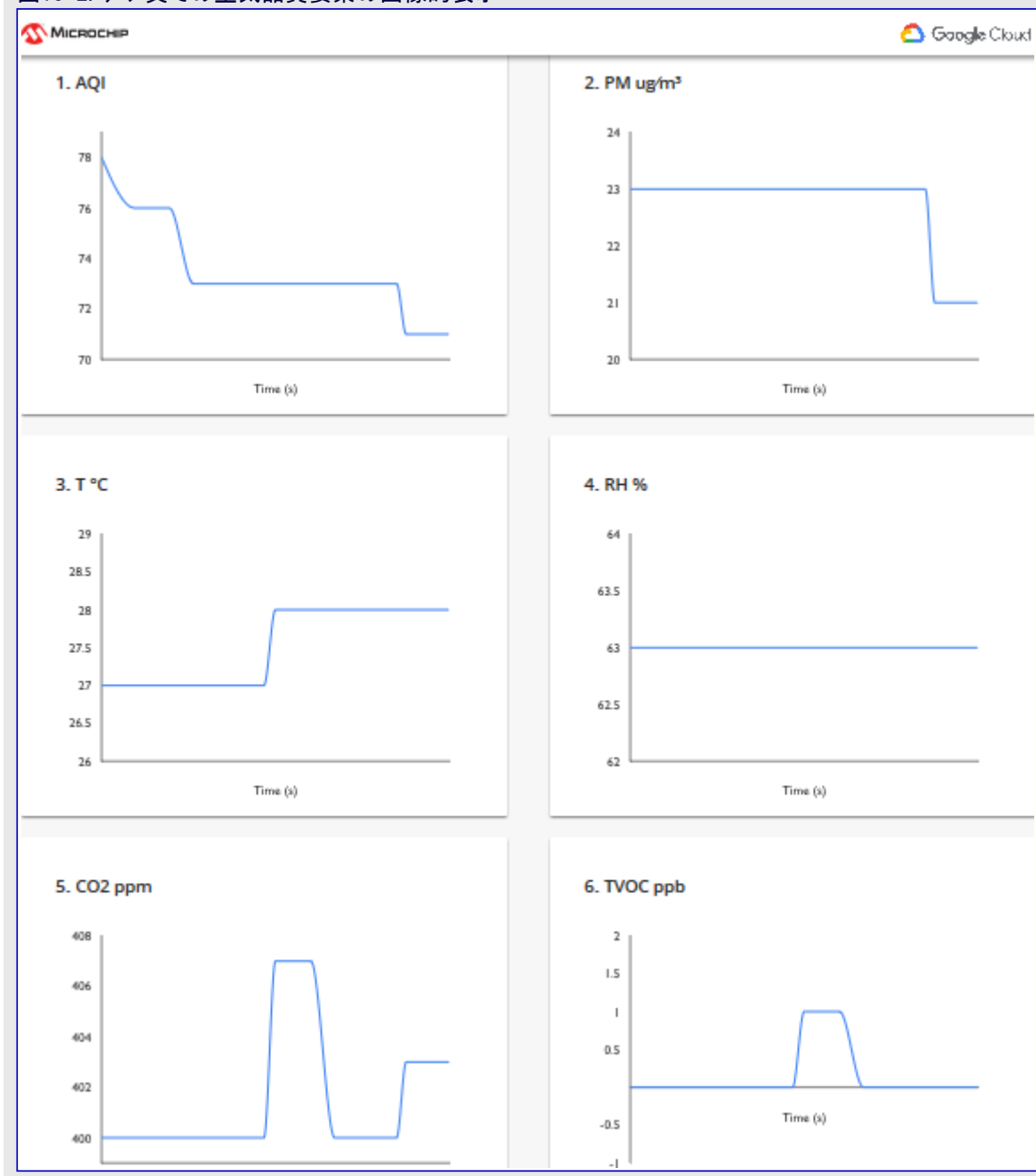


10.2. AQM要素の可視化

Wi-Fiインターフェースを通して一旦基板がGoogleクラウドに接続されると、AQMはクラウドへのデータアップロードを開始します。黄LEDはデータがアップロードされている間点滅します。avr-iot.comウェブ頁は図10-2.で示されるように、画像的な見方で様々な感知器から集められたデータを示します。

注: 図で示される要素の順番はファームウェアに於いてJSONオブジェクトで順番を変更することによって変えることができます。

図10-2. ウェブページでの空気品質要素の画像的表示



11. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
A	2020年3月	初版資料公開

Microchipウェブ サイト

Microchipは<http://www.microchip.com/>で当社のウェブ サイト経由でのオンライン支援を提供します。このウェブ サイトはお客様がファイルや情報を容易に利用可能にするのに使われます。利用可能な情報のいくつかは以下を含みます。

- ・ **製品支援** – データシートと障害情報、応用記述と試供プログラム、設計資源、使用者の手引きとハードウェア支援資料、最新ソフトウェア配布と保管されたソフトウェア
- ・ **全般的な技術支援** – 良くある質問(FAQ)、技術支援要求、オンライン検討グループ、Microchip設計協力課程会員一覧
- ・ **Microshipの事業** – 製品選択器と注文の手引き、最新Microchip報道発表、セミナーとイベントの一覧、Microchip営業所の一覧、代理店と代表する工場

製品変更通知サービス

Microchipの製品変更通知サービスはMicrochip製品を最新に保つのに役立ちます。加入者は指定した製品系統や興味のある開発ツールに関連する変更、更新、改訂、障害情報がある場合に必ず電子メール通知を受け取ります。

登録するには<http://www.microchip.com/pcn>へ行って登録指示に従ってください。

お客様支援

Microchip製品の使用者は以下のいくつかのチャネルを通して支援を受け取ることができます。

- ・ 代理店または販売会社
- ・ 最寄りの営業所
- ・ 組み込み解決技術者(ESE:Embedded Solutions Engineer)
- ・ 技術支援

お客様は支援に関してこれらの代理店、販売会社、またはESEに連絡を取るべきです。最寄りの営業所もお客様の手助けに利用できます。営業所と位置の一覧はこの資料の後ろに含まれます。

技術支援は<http://www.microchip.com/support>でのウェブ サイトを通して利用できます。

Microchipデバイス コード保護機能

Microchipデバイスでの以下のコード保護機能の詳細に注意してください。

- ・ Microchip製品はそれら特定のMicrochipデータシートに含まれる仕様に合致します。
- ・ Microchipは意図した方法と通常条件下で使われる時に、その製品系統が今日の市場でその種類の最も安全な系統の1つであると考えます。
- ・ コード保護機能を破るのに使われる不正でおそらく違法な方法があります。当社の知る限りこれらの方法の全てはMicrochipのデータシートに含まれた動作仕様外の方法でMicrochip製品を使うことが必要です。おそらく、それを行う人は知的財産の窃盗に関与しています。
- ・ Microchipはそれらのコードの完全性について心配されているお客様と共に働きたいと思います。
- ・ Microchipや他のどの半導体製造業者もそれらのコードの安全を保証することはできません。コード保護は当社が製品を”破ることができない”として保証すると言うことを意味しません。

コード保護は常に進化しています。Microchipは当社製品のコード保護機能を継続的に改善することを約束します。Microchipのコード保護機能を破る試みはデジタル ミレニアム著作権法に違反するかもしれません。そのような行為があなたのソフトウェアや他の著作物に不正なアクセスを許す場合、その法律下の救済のために訴権を持つかもしれません。

法的通知

デバイス応用などに関してこの刊行物に含まれる情報は皆さまの便宜のためにだけ提供され、更新によって取り換えられるかもしれません。皆さまの応用が皆さまの仕様に合致するのを保証するのは皆さまの責任です。**Microchipはその条件、品質、性能、商品性、目的適合性を含め、明示的にも黙示的にもその情報に関連して書面または表記された書面または黙示の如何なる表明や保証もしません。**Microchipはこの情報とそれの使用から生じる全責任を否認します。生命維持や安全応用でのMicrochipデバイスの使用は完全に購入者の危険性で、購入者はそのような使用に起因する全ての損害、請求、訴訟、費用からMicrochipを擁護し、補償し、免責にすることに同意します。他に言及されない限り、Microchipのどの知的財産権下でも暗黙的または違う方法で許認可は譲渡されません。

商標

Microchipの名前とロゴ、Microchipロゴ、Adaptec、AnyRate、AVR、AVRロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKITロゴ、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemiロゴ、MOST、MOSTロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PacTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32ロゴ、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SSTロゴ、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TempTracker、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron、XMEGAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plusロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、Vite、WinPath、ZLは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNetロゴ、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certifiedロゴ、MPLAB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REALICE、Ripple Blocker、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、View Sense、WiperLock、Wireless DNA、ZENAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの商標です。

SQTPは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの役務標章です。

Adaptecロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcomは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の登録商標です。

GestICは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の子会社であるMicrochip Technology Germany II GmbH & Co. KGの登録商標です。

ここで言及した以外の全ての商標はそれら各々の会社の所有物です。

© 2020年、Microchip Technology Incorporated、米国印刷、不許複製

AMBA、Arm、Arm7、Arm7TDMI、Arm9、Arm11、Artisan、big.LITTLE、Cordio、CoreLink、CoreSight、Cortex、DesignStart、DynamIQ、Jazelle、Keil、Mali、Mbed、Mbed Enabled、NEON、POP、RealView、SecurCore、Socrates、Thumb、TrustZone、ULINK、ULINK 2、ULINK-ME、ULINK-PLUS、ULINKpro、µVision、Versatileは米国や他の国に於けるArm Limited(とその子会社)の商標または登録商標です。

品質管理システム

Microchipの品質管理システムに関する情報については<http://www.microchip.com/quality>を訪ねてください。

日本語© HERO 2020.

本応用記述はMicrochipのAN3403応用記述(DS00003403A-2020年3月)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。

世界的な販売とサービス

米国	亜細亜/太平洋	亜細亜/太平洋	欧州
本社 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277 技術支援: http://www.microchip.com/support ウェブアドレス: http://www.microchip.com アトランタ Duluth, GA Tel: 678-957-9614 Fax: 678-957-1455 オースチン TX Tel: 512-257-3370 ボストン Westborough, MA Tel: 774-760-0087 Fax: 774-760-0088 シカゴ Itasca, IL Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075 ダラス Addison, TX Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924 デトロイト Novi, MI Tel: 248-848-4000 ヒューストン TX Tel: 281-894-5983 インディアナポリス Noblesville, IN Tel: 317-773-8323 Fax: 317-773-5453 Tel: 317-536-2380 ロサンゼルス Mission Viejo, CA Tel: 949-462-9523 Fax: 949-462-9608 Tel: 951-273-7800 ローリー NC Tel: 919-844-7510 ニューヨーク NY Tel: 631-435-6000 サンホセ CA Tel: 408-735-9110 Tel: 408-436-4270 カナダ - トロント Tel: 905-695-1980 Fax: 905-695-2078	オーストラリア - シドニー Tel: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 Tel: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 Tel: 86-28-8665-5511 中国 - 重慶 Tel: 86-23-8980-9588 中国 - 東莞 Tel: 86-769-8702-9880 中国 - 広州 Tel: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 Tel: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 Tel: 852-2943-5100 中国 - 南京 Tel: 86-25-8473-2460 中国 - 青島 Tel: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 Tel: 86-21-3326-8000 中国 - 瀋陽 Tel: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 Tel: 86-755-8864-2200 中国 - 蘇州 Tel: 86-186-6233-1526 中国 - 武漢 Tel: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 Tel: 86-29-8833-7252 中国 - 廈門 Tel: 86-592-2388138 中国 - 珠海 Tel: 86-756-3210040	インド - ハンガロール Tel: 91-80-3090-4444 インド - ニューデリー Tel: 91-11-4160-8631 インド - プネー Tel: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 Tel: 81-6-6152-7160 日本 - 東京 Tel: 81-3-6880-3770 韓国 - 大邱 Tel: 82-53-744-4301 韓国 - ソウル Tel: 82-2-554-7200 マレーシア - クアラルンプール Tel: 60-3-7651-7906 マレーシア - ペナン Tel: 60-4-227-8870 フィリピン - マニラ Tel: 63-2-634-9065 シンガポール Tel: 65-6334-8870 台湾 - 新竹 Tel: 886-3-577-8366 台湾 - 高雄 Tel: 886-7-213-7830 台湾 - 台北 Tel: 886-2-2508-8600 タイ - バンコク Tel: 66-2-694-1351 ベトナム - ホーチミン Tel: 84-28-5448-2100	オーストラリア - ウェルズ Tel: 43-7242-2244-39 Fax: 43-7242-2244-393 デンマーク - コペンハーゲン Tel: 45-4485-5910 Fax: 45-4485-2829 フィンランド - エスボ Tel: 358-9-4520-820 フランス - パリ Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79 ドイツ - ガルヒング Tel: 49-8931-9700 ドイツ - ハーネ Tel: 49-2129-3766400 ドイツ - ハイムブロン Tel: 49-7131-72400 ドイツ - カールスルーエ Tel: 49-721-625370 ドイツ - ミュンヘン Tel: 49-89-627-144-0 Fax: 49-89-627-144-44 ドイツ - ローゼンハイム Tel: 49-8031-354-560 イスラエル - ラーナナ Tel: 972-9-744-7705 イタリア - ミラノ Tel: 39-0331-742611 Fax: 39-0331-466781 イタリア - ハットバ Tel: 39-049-7625286 オランダ - デルフト Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340 ノルウェー - トロンハイム Tel: 47-72884388 ポーランド - ワルシャワ Tel: 48-22-3325737 ルーマニア - ブカレスト Tel: 40-21-407-87-50 スペイン - マドリード Tel: 34-91-708-08-90 Fax: 34-91-708-08-91 スウェーデン - イェテボリ Tel: 46-31-704-60-40 スウェーデン - ストックホルム Tel: 46-8-5090-4654 イギリス - ウォーキンガム Tel: 44-118-921-5800 Fax: 44-118-921-5820