

発展途上国での頻繁な停電に対応する 小型大気環境計測器用の対策回路の製作

○山崎高幸^{A)}、岡本 渉^{A)}、松見 豊

^{A)} 全学技術センター 計測制御支援室 観測技術グループ

^{B)} 名古屋大学（宇宙地球環境研究所） 名誉教授

概要

筆者らは自分達で設計・製作した小型大気環境計測器（以降、計測器と呼ぶ）を、アジアを中心とした世界の10か国以上に100台以上配置してその運用を行っている。しかし電源が安定している日本で上手く動作しても、計測器の配置場所の電源が不安定な発展途上国であれば停電で止まってしまうデータが取れなくなるばかりか急な電源断で計測器が壊れてしまうこともある。今回、インドに多数の計測器を配置していく計画の中に急遽電源対策を行うことになったのだが、無停電電源装置の使用が運搬や調達・安全性の面から難しいため、電源起動時のチャタリングに備えたオンディレー、瞬断や停電時に安定電圧を数分保ったオフディレー動作を兼ねた回路を製作した。インドの農村地帯のパンジャブ州やハリヤナ州では1日に10回以上の停電があり、そこで運用中の30台の計測器用に対策回路を製作したので、その結果も合わせて発表する。

1 小型大気環境計測器

第12回技術報告会にて「小型PM2.5計測器の製作」をポスター発表した^[1]。今回の計測器はその発展版でPM2.5センサ以外にも大気中の化学種を測定する電気化学センサを4個まで取り付けて観測する事が可能である。CPUとしてRaspberry Pi A+を使いデータ取得・メモリ保存だけでなく携帯電話回線を使ってサーバーへ1日1回程度の自動データアップロードを可能にした^[2]。

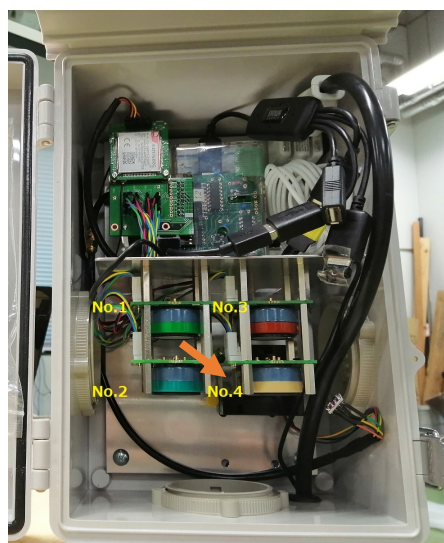


図1 発展途上国に多数配置している小型大気環境計測器（下段に4つ付いている丸いのが Alphasense 社の電気化学センサ、PM2.5 センサ（矢印）はこの奥にある、装置全体で高さ 280mm の大きさ）



図2 増設基板上的の表示器

計測器の箱は、タカチのプラケース BCAP192814G に大気取り込み用の穴φ75mm を3か所空けた加工品を使っており、サイズは横190mm、縦280mm、奥行き140mm とコンパクトである。

なお、計測器（Raspberry Pi）への入力電源は5Vである。AC-DC変換アダプタを使いmicro USBで入力する。因みにインドの電源電圧はAC230Vである。入力仕様がAC100-240Vなので問題はないが、現地ではCタイプ3ピンの電源コネクタを使って現地の商用電源を利用している。



図3 インドに配置した小型大気環境計測器の例
（矢印で示した所へ設置）

表1. Alphasense センサの取り付け例とセンサ感度（ISB-B4 Bord を取り付けした時：Alphasense 社 HP より引用）

型番種類	計測対象	Sensor Sensitivity (nA/ppm)
CO-B4	一酸化炭素	420
NO-B4	一酸化窒素	540
NO2-B43F	二酸化窒素	230
OX-B431	オゾン	216

1.1 Alphasense 社の大気化学種のセンサ

この小型大気環境計測器は、PM2.5 センサを標準で搭載し、Alphasense のセンサを4個、ユーザーが自由に組み合わせて搭載できるよう拡張基板を経由して、A/D 値を Raspberry Pi で読み込んでいる。インド用として取り付けした Alphasense センサの例を表1に示す。

1.2 拡張基板（センサと増設基板の I/F）

拡張基板は、Alphasense などの4個分のセンサのアナログ信号を繋げるコネクタの I/F ボードである。

1.3 増設基板（Raspberry Pi への入力 I/F）

増設基板は A/D コンバータ MCP3208（8ch 12bit, SPI 接続）、クロックモジュール（I2C 接続）、2行の有機液晶表示器（I2C 接続）及び温湿度モジュール（I2C 接続）を繋げる入力 I/F を有する。計測器への PM2.5 センサ（名古屋大学松見研とパナソニック（株）との共同研究で開発）との通信はシリアル接続である。

- ・PM2.5 センサ 最小検知粒子径：0.3 μm
- ・温湿度モジュール 【SHT3-D、I2C】
- ・高精度クロックモジュール【DS3231、I2C】
- ・有機 LED 表示器 【0.91 インチモジュール(青)、I2C】

増設基板上の表示器で、計測器の動作を確認できる（図2）。計測器の表示は、“日付時間”、“PM2.5 濃度（質量濃度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）”、“ソフトウェアバージョン”、“温度（℃）”である。桁数が限られているため、2行16桁の文字列にこれらを表示している。終了処理を行う間は、“wait 20sec”と表示することになっている。これは、シャットダウンに約20秒必要なためである。

1.4 インドへの配置

この小型大気環境計測器を2020年度に動作確認したものを30台準備し、2021年から2022年夏までに徐々にインド北西部の農村地帯に配置した（図3、図4）。なお配置は総合地球環境学研究所の Aakash プロジェクトのメンバーが行っている。プロジェクトの概要は下記参照。

Aakash プロジェクト <https://aakash-rihn.org/about-project/>

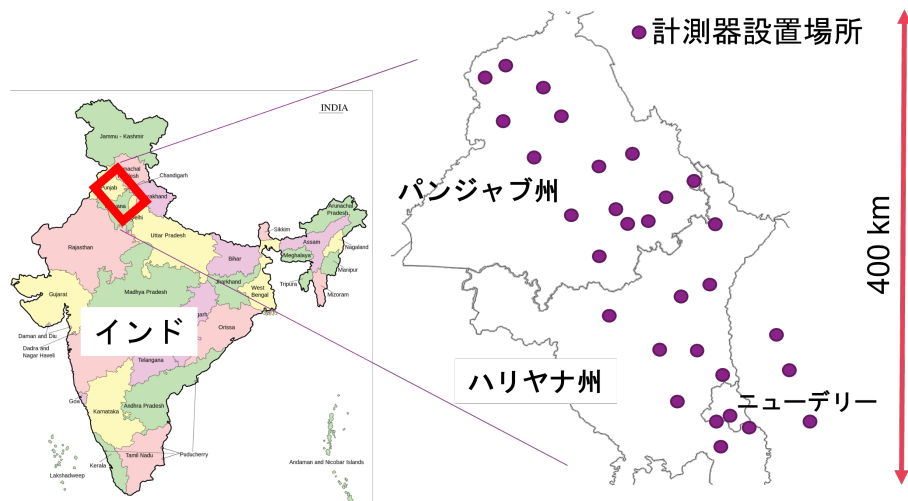


図 4 インドに多数配置している小型大気環境計測器

インドなどアジアの発展途上国では頻繁に停電が起こるので、その対策が必要である。実際にインドで観測していると、数秒から何時間にもわたる停電が 1 日に多数、数十回もある。そこで小型大気環境計測器にふさわしい停電対策を考えて製作した。市販の無停電装置（UPS）は大型で高価であり、多数の計測器毎に設置するのは難しい。リチウム電池を使った小型の UPS もあるが、民家の屋外にあつて温度差が大きく湿度も高くなる条件の計測器に取り付けるには、リチウム電池特有の爆発・火災のリスクがある。計測器の中に使っている Raspberry Pi などの CPU は、突然の停電により、SD カード内にある OS（Linux）などが破壊されてしまう可能性がある。停電で計測の欠損が出ることは仕方が無いとしても、計測器の破損を防ぐ必要がある。

2 停電対策回路の設計

今回は停電対策回路として、停電が起こった時にそれを検知して、大容量コンデンサで短時間は電気を供給して OS の退避動作をさせる回路を製作した。停電対策回路は、計測器が終了するまでの電源供給を維持して安全にシャットダウンするまで持てば良いため 1 分程度の時間で十分である。そのため、電気を貯めて置くことができるコンデンサと 5V 供給を維持するための昇電圧 DC-DC コンバータ（表 2）を使用した。一方で、起動時においては、発展途上国はどのような発電及び給電機能になっているか分からず、また頻繁な短時間の ON/OFF なども発生する可能性の対策として、計測の数分程度の欠損は問題にはならないことから、停電後に電源が回復・供給されてから直ぐに起動させるのではなく、3 分～5 分の時間を待ってから Raspberry Pi を起動させる事にした。

表 2. 昇電圧 DC-DC コンバータモジュール

	TPS63020	TPS61200
Vin(MIN)	1.8[V]	0.3[V]
Vin(MAX)	5.5[V]	5.5[V]
Vout(MAX)	5.5[V]	5.5[V]
IMAX	2.0[A]	0.6[A]

2.1 昇電圧 DC-DC コンバータ

初めは TPS63020 昇電圧 DC-DC コンバータモジュールで試作を行った。しかし、途中で入力電圧が低い方が長く持ちこたえることが分かったため、TPS61200 昇電圧 DC-DC コンバータモジュールに変更した。

- TPS63020 動作入力電圧範囲：1.8V～5.5V、最大負荷電流出力：2A
- TPS61200 動作入力電圧範囲：0.3V～5.5V、最大負荷電流出力：0.6A

2.2 タイマー IC（NJM555）

タイマー IC NJM555 を使い、単安定マルチバイブレータの機能を使い外部電源の ON で one-shot 動作を行

う。 R （抵抗値） $\times C$ （静電容量）の大きさで決まる ON になる T_w （パルス幅）時間は 180～240 秒を仕様とした。タイマー IC を使った one-shot 動作についてはトランジスタ技術記事^[3]を参照した。実際は、抵抗は $2M\Omega$ とコンデンサは $100\mu F$ を用いて、 $T_w=(R \times C) \times 1.1 \div 220$ （秒）となるようにした。またタイマー IC NJM555 により 4 分以内の多数回の停電と復帰の繰り返しでは 1 回しか応答しないようにしている^{[4][5]}。

2.3 単安定マルチバイブレータ 74HC123AP

単安定マルチバイブレータ^[6]は、外部電源の電源停止と同時に作動する。つまり停電をモニターしている。そして、立下りトリガを検知した後の電源供給を数十秒維持して、その間にソフトウェアが終了処理を行う。

ただし、外部電源復帰は、タイマー IC でモニターしている。なお、復電していない場合はそのまま停電のままである。こちらもパルス幅はほぼ $T_w=1.0 \times (C_x \cdot R_x)$ となるため、実際の部品は、 $100\mu F$ と $680k\Omega$ 、つまり T_w を 68 秒とした。

2.4 電気 2 重層大容量コンデンサ（7.5F、耐 5.4V コンデンサ）

蓄電コンデンサとして、7.5F コンデンサを使用した。平常時にこのコンデンサに 5V を充電することで、停電時の緊急の電源の役割を持たせる。停電時にその電力を使用すると次第に電圧が下がるので、昇降圧コンバータを使うことにより出力の 5V を確保する。

初めは 25F コンデンサを検討したが、回路基板への取り付けが必要な配線タイプだったのと、それ程大きくなくても 1 分程度の電圧保持が可能なことからピンタイプにした。昇電圧 DC-DC コンバータが最小電圧の 0.3V を切ると、出力電圧は無くなる。

我々の計測装置の負荷電流では、コンデンサの電圧が最小入力電圧の 0.3V を下回るのは 90 秒以上の時間後なので、5V の出力電圧がなくなる。しかし、30 秒程度で Raspberry Pi の OS の退避処理が完了するので十分な動作ができる。

2.5 OS の退避処理（Raspberry Pi）

Raspberry Pi の一つの GPIO を入力モードで使用し、その端子が High か Low かで停電になったかどうかを判定できる^{[7][8][9]}。蓄電コンデンサの入力の前の電圧をモニターして Low を認識すると停電退避処理を行う。

GPIO 信号は拡張基板を経由して、Raspberry Pi に入る。拡張基板は図 5 を参照。実際は GPIO13 と GND を配線で停電対策回路と計測器（拡張基板）を接続している（図 6）。

2.6 ダイオード機能 IC 低電流源

大容量コンデンサへの 5V 供給側に電流制限器を 6 個平行に【NS150350AST3G（ $350mA \times 6=2100mA$ ）】取り付けた。電源の回復時に大容量コンデンサの充電に多大な電流が流れないように制限した。

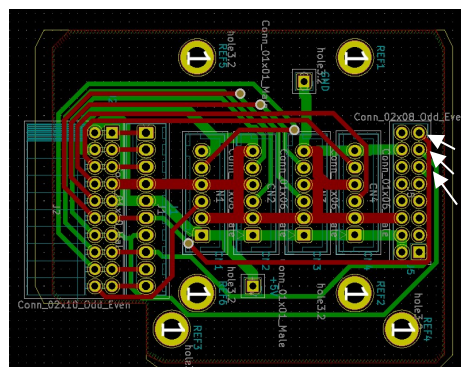


図 5 拡張基板（Raspberry Pi への GPIO 回路 I/F）
（電源 OFF 信号:GPIO13、動作確認 LED : GPIO5）

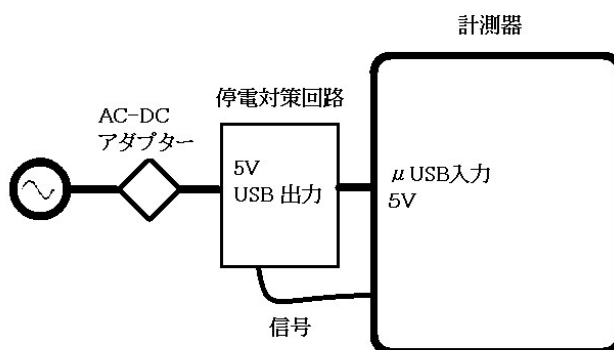
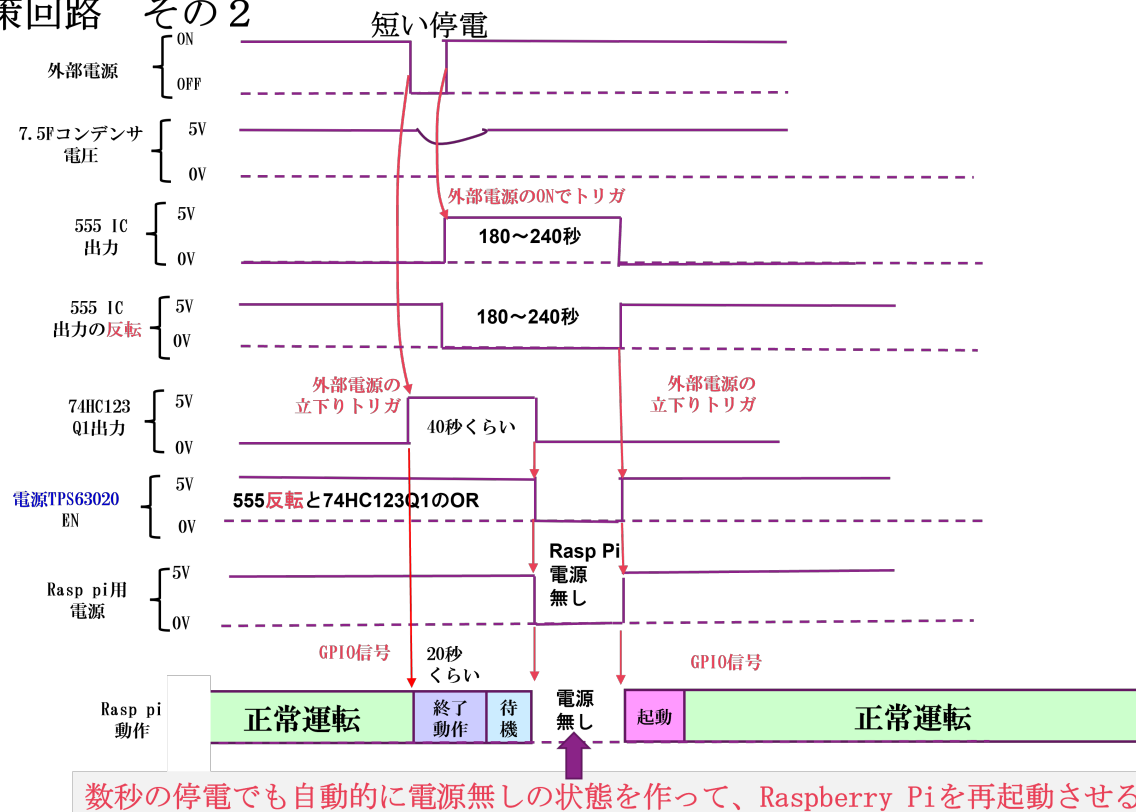


図 6 計測器と停電対策回路の電源系統と信号の概略図

図 7 停電対策回路の設計図

停電対策回路 その2



3 停電対策回路の製作

3.1 基板サイズ

基板サイズは、小型大気環境計測器に入る大きさで縦 100mm、横 90mm とした。

回路パターン設計は KiCad :Version: (5.1.4) を利用した。KiCad は、回路設計やパターンの設計、製造工場のルールに沿っているかのチェックなど、さまざまな工程を経てプリント基板の製造データを出力してくれる^[10]。(トランジスタ技術 SPECIAL No.148 より)

IC が 1 個程度ならユニバーサル基板に実装して試作するが、今回のように昇電圧 DC-DC コンバータや IC を 3 個以上使う場合は、回路設計ツールを使う事を推奨する。

※KiCad : GNU GPL(GNU General Public License)というライセンスの元に開発されたオープン・ソースのプリント基板設計 CAD (Computer Aided Design) である。ライブラリの作成等、詳しい使い方は雑誌^[10]や書籍を参照。

参照：トランジスタ技術スペシャル 2019 Autumn

筆者が KiCad を使っていて一番良いと感じた所は、Auto Router と呼ばれる自動でパターンを配線してくれる機能である。(外部ツールで別途 Down Load する) ツール使用前の部品配置図 (図 9) とそのツール使用後のパターン配線図 (図 10) を示す。このくらいの規模では、30 分位で自動配線を終えてくれる。

[自動配線ツール] <https://github.com/freeroutig/freerouting>

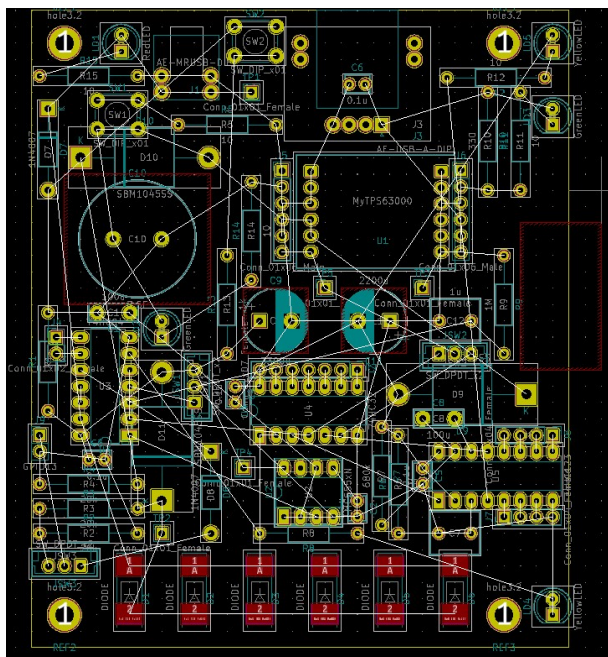


図9 自動配線前のレイアウト

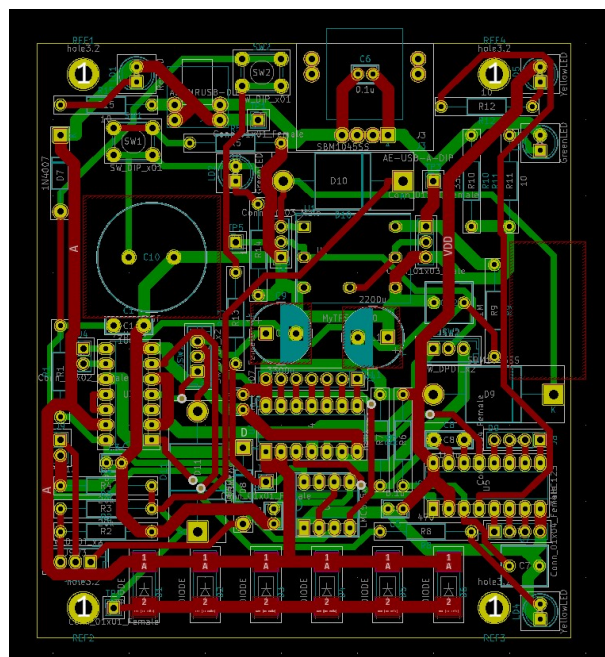


図10 自動配線後のレイアウト

4 停電対策回路の動作確認・評価

4.1 動作確認及び修正

動作確認は、パソコンに表示する USB 接続の 8ch オシロスコープのプロープとそのソフトウェア（Hantek1008A 8ch）を使って確認した。また出来上がった停電対策実装基板の動作は、AC-DC アダプターの micro USB 端子の 5V を一旦停電対策回路に入力して、停電対策回路から出力される USB 端子の 5V を計測器に入れて（図 6）下記の事を確認して行なった。

- ・ AC 電源を ON して、計測器への供給電源 5V が入り起動するか（起動確認）
- ・ 計測中に電源を OFF/ON して、計測器が一旦シャットダウン後に起動するか（停電処理及び起動確認）
- ・ AC 電源を OFF して、計測器のシャットダウン処理後に出力電源 5V が切れるか（停電処理確認）
- ・ AC 電源 OFF/ON を 10 回繰り返して、計測器が起動するか（ON 時のチャタリング確認）

を確認し（図 11）、問題があれば修正等を行なった。

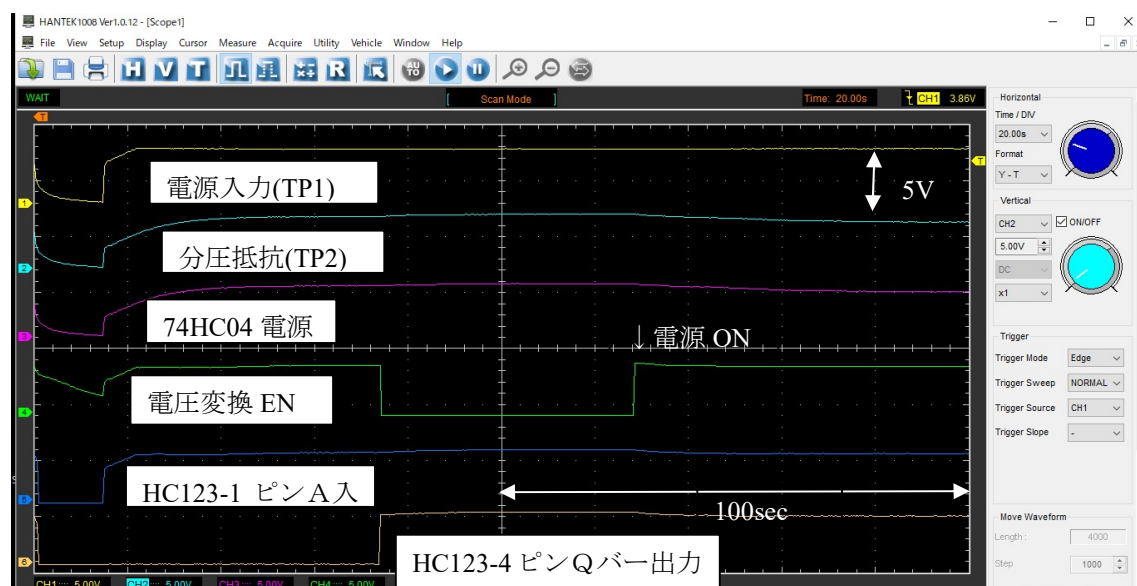


図 11 Hantek1008A 8ch PC オシロスコープで確認した動作の一例

（電源 ON 状態 → 5sec OFF → 電源 ON 状態）

4.2 量産

製作枚数が30枚と多いため、基板の製作は中国の基板製作会社 FUSION PCB [<https://www.fusionpcb.jp/>]へ発注した。部品実装はマシナックス株式会社[<http://www.mashinax.jp/>]へ外注した。

5 まとめ

この対策回路を製作し動作確認を行ってインドに持参したが、実際は現地で計測器が問題なく動いていれば OK という事になるため、評価は難しい。自分が渡航した訳ではなく聞いた話である。実際に筆者が渡航して設置した訳ではないが、30枚持参してもらい無事に現地で動作して計測を継続しているそうである。

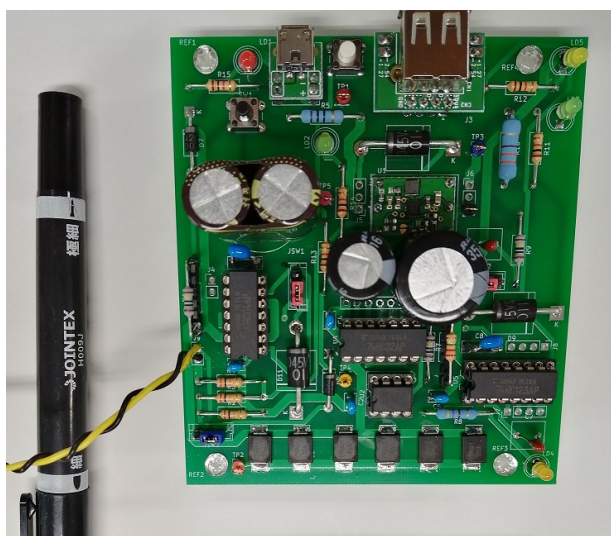


図12 製作した「停電対策回路」
（黄黒の配線で拡張基板へ GPIO 信号を送る）

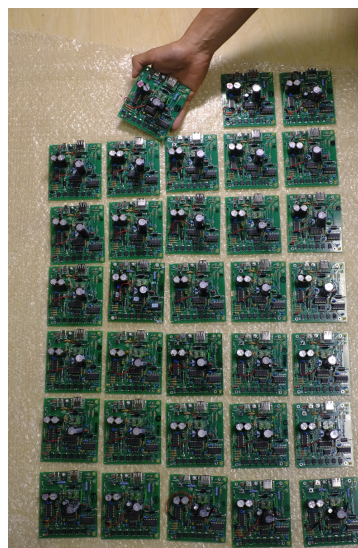


図13 30枚の実装基板（修正対策を施したもの）

参考文献

- [1] 山崎他, “小型 PM2.5 の計測器製作”, Homepage (<http://www.tech.nagoya-u.ac.jp/archive/h28/report.html>)
- [2] 松見豊他, “遠隔地で多点展開が可能な PM2.5、Ox、CO、NOx などの大気汚染物質の超小型でローコストな計測装置の開発” 第62回大気環境学会予稿集, 2021年9月15日～17日 P-69 ポスター
- [3] トランジスタ技術, “2004年1月号”, 第2章デジタル回路 p116
- [4] <https://kazuikazui.dreamlog.jp/archives/52454303.html> オンディレイタイマの制作 その1
- [5] <https://kazuikazui.dreamlog.jp/archives/52463320.html> オンディレイタイマの制作 その2
- [6] TC74HC123AP データシート/日本語 2016-12-02
- [7] <https://tool-lab.com/raspberrypi-startup-22/> Raspberry Pi の GPIO 概要
- [8] <https://techhobby.net/2020/04/13/raspberry-pi%E3%81%AEgpio%E3%83%94%E3%83%B3%E3%81%AE%E9%9B%BB%E6%B0%97%E7%9A%84%E4%BB%95%E6%A7%98/> Raspberry Pi の電氣的仕様
- [9] <https://ssl.xrea.com/tmct.s1009.xrea.com/doc/ta-ja-7e4b02.html> GPIO を自在に制御する
- [10] トランジスタ技術 SPECIAL No.148 2019 Autumn