

小型大気環境計測器の開発とインドでの運用

○山崎高幸^{A)}、岡本渉^{A)}、松見豊^{B)}、中山智喜^{C)}

^{A)} 計測制御技術支援室 観測技術グループ

^{B)} 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

^{C)} 長崎大学大学院

概要

我々は、ローコストな小型な大気計測器（PM_{2.5}, CO, NO_x, O₃）を装置開発し、種々の研究グループと協力して、世界各地（インド、アラスカ、グリーンランド、モンゴル、ベトナム、ロシア、インドネシア、日本各地、など）で設置・運用している。今回の発表では、インドのパンジャブ州の農村地域に 200 km x 400km の広域の計測ネットワークとして小型大気環境計測器 30 台を農家などの屋外に設置して、2年間無人で運用している様子についてお話する。装置を含めて従来の標準的な計測器の 1/10 以下のコストで、十分な精度の大気汚染物質の計測値を 2 年間にわたって取得できている。インドでの携帯電話回線を使ったリアルタイムデータ取得、頻繁に起こる停電、センサの劣化などのトラブルに対処してきている。インドでのこの計測は総合地球環境学研究所（京都）の Aakash プロジェクトとの共同研究であり、インドの人々に健康影響を及ぼす稲わら焼きによる大気汚染の機構を探りその解決を図ることを目指している。開発・設置・運用している小型大気環境計測器の写真（図 1）を示す。PM_{2.5} センサは名古屋大学とパナソニック（株）とで共同開発したものである。

1 小型大気環境計測器の開発

1.1 小型大気環境計測器

第 12 回技術報告会にて「小型 PM_{2.5} 計測器の製作」をポスター発表した^[3]。今回の計測器はその発展版で PM_{2.5} 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な計測器^[5]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が可能な計測器である^[6]。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 φ 75mm 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。12V より 5V に変換する DC-DC を使い micro USB で入力している。因みにインドの電源電圧は AC 230V である。入力仕様が AC100-240V なので問題はない AC-DC を使用している。今回、UPS システムを導入し、インドでの頻繁な停電に対応するシステムに改良した。この UPS システムについては 2.2 章で説明する。AC の供給は現地の商用電源を利用するため、インド用のプラグに現地を変更した。装置のブロックダイアグラムを巻末に載せた（図 10）。

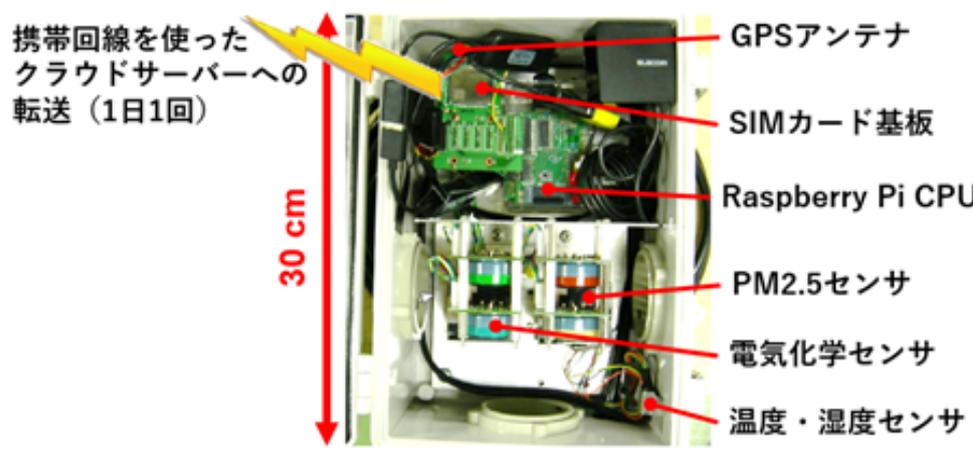


図 1. インドで 30 台設置・運用しているローコストな小型大気環境計測器
 （下段に 4 つ付いている丸いのが Alphasense 社の電気化学センサ、PM2.5 センサはこの奥にある）

1.2 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 を標準で搭載し、Alphasense のセンサを 4 個組み合わせ自由でユーザーが搭載できるよう拡張基板を経由して、A/D 値を RaspberryPi で読み込んでいる。インド用として取り付けした Alphasense の例を表 1 に示す。

表 1. Alphasense 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

1.3 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。

1.4 増設基板（RaspberryPi への入力 I/F）

増設基板（図 1 の緑色の基板）は A/D3008(8ch 12bit, SPI 接続)とクロックモジュール、2 行の有機液晶表示器 (I2C 接続)、および、計測器への PM2.5 センサ（シリアル接続）と温湿度モジュール (I2C 接続) を繋げる入力 I/F を有する。

- ・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】
- ・高精度クロックモジュール 【DS3231 AT24C32 I2C】
- ・OLED 表示器 【0.91 インチモジュール(青)】

増設基板上の表示器で、計測器の動作を確認している。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 ($^{\circ}\text{C}$)” 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 ” と表示している。これは、シャットダウンに 20sec 必要なためである。

1.5 ローコストセンサの優位性

我々の装置は、CPU 電子部品等を含む装置箱が 15 万円程度、Alphasense 社の大気化学種のセンサ 4 つで

16万円程度である。発展途上国には、政府や公共機関の大気観測のサイトのデータもあるが、メンテナンスが不備のため値が信用できないため、このようなローコストでコンパクトな計測器を分散配置することで、大気汚染が深刻な場所で何が問題なのか研究するのに有効である。

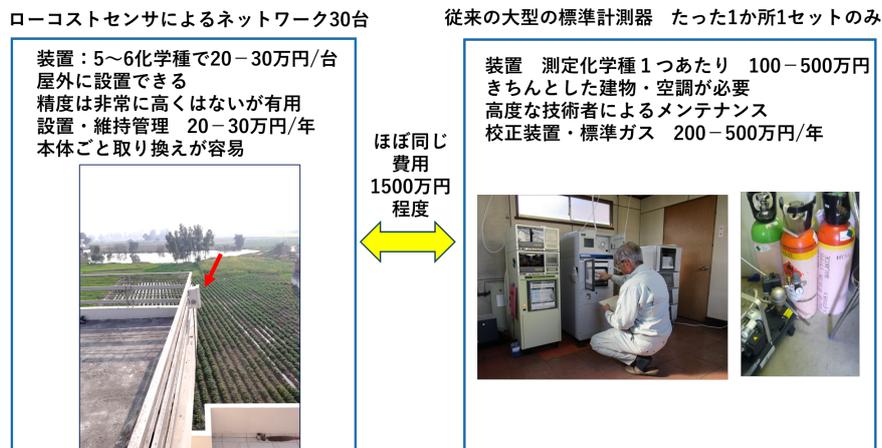


図2. 同じ予算でローコストセンサを多数配置できる

2 インドでの運用（再配置・計測器の改良・日本での整備）

2.1 インドでの運用（再配置）

この小型大気環境計測器を2023年度に30台のうち20台再整備し、動作確認した。また2023年秋までに2回渡航して、インド北西部の農村地帯に再配置した（図3、図4）。なお再配置が必要ない10台はそのまま運用した。プロジェクトはインドの大気汚染の原因を探るためプロジェクトで2020年4月よりスタートした。

プロジェクトの詳細は下記をご覧ください。

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

図5は、2023年の再設置で著者がインドを訪れた時のスナップショットです。

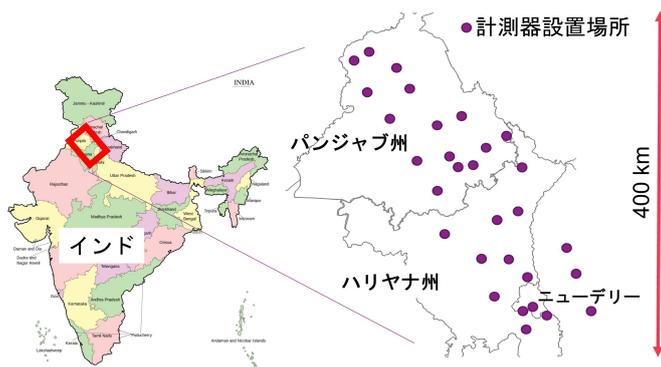


図3.インドにネット状に配置している小型大気環境計測器（全体で30個の装置）



図 4. 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）



図 5. 2023年のインドで再設置したサイトの一例（計測器は赤矢印、左端が著者）

インドなどの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。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。第2回技術発表会では“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”でポスター発表した^[4]。今回のUPSシステムはその発展版である。

2.2 UPSシステム

リチウム電池は屋外の高温・高湿度の条件では爆発の危険があり飛行機輸送も禁じられているので、バイクなどに用いられ現地で手に入る鉛シールド電池を使用したUPSシステムを開発した。UPSのイメージ図は図6を参照。Solar battery Controllerは電源供給がなくなった時にバッテリーからの供給を行う。入力は15VのAC-DCを使っている。

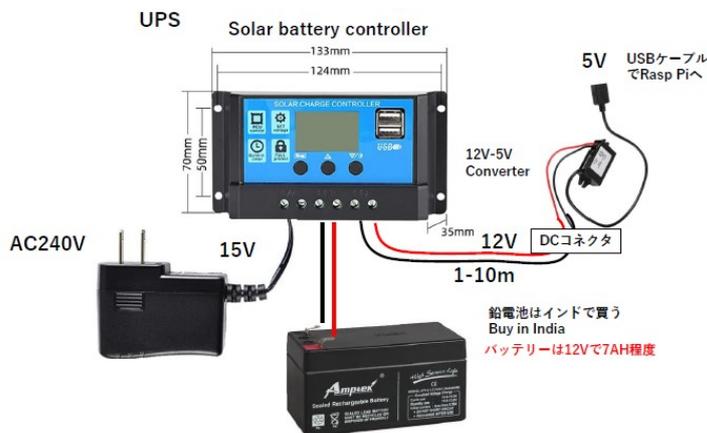


図 6. 鉛シールド蓄電池を使ったUPSシステム

12V 7AH のもので 20 時間程度の持続時間、12V 2AH のもので 6 時間程度の持続時間が供給可能であり、

仮に供給が切れてしまっても、バッテリーが充電されれば電源供給は開始され、計測器は起動する仕組みである。コンパクトな箱に収めているためどのような向きでも置けるように「Lead Sealed」が重要である。

2.3 計測器の改良 (ハングアップ対策)

Raspberry Pi は理由もなく2年に1度程度ハングアップしてしまう。計測器30台だと毎月どこかで起きる可能性がある。その場合現地に人が行って電源を一度 OFF/ON するまで欠測となる。そのために Watchdog Timer を設置した。パルスが送られてこなくなってから、すぐにいったん電源を切るのではなくて、ディレイを置いて60秒後に切断するように内蔵のPICのプログラムを改造してもらった。特注で改造を依頼した。回路(図7)の製作所は福岡にある【暁電子工房】である。

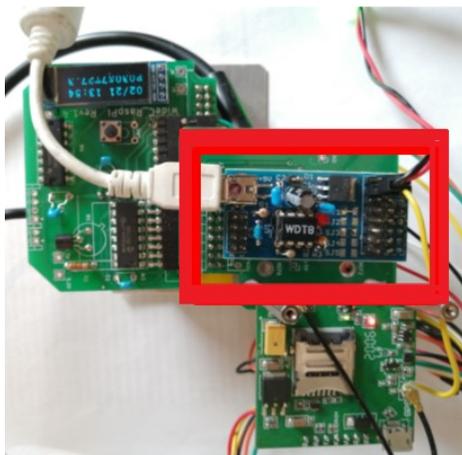


図7. ハングアップ対策の Watchdog Timer 回路

2.4 日本での整備

2023年4~6月に日本に持ち帰った計測器のメンテナンスを行った。屋外で無人運用しているため、2年が経過した2023年度に計測器の整備を行った。メンテナンスは箱の洗浄、データバックアップ、ボタン電池の交換等でリストを使って管理した(表2)。図8は、研究所屋上での動作確認の様子である。

表2. 2023年4~6月に行った計測器のメンテナンスチェックリスト

装置番号	クリーニング	起動するか? copy/mnt OLD Backup Server Up Version UP	状況(原いた時)	ニブラによる蓋の改良 通信Uploadチェック	GPS受信 電圧交換 時計合わせ 時刻合わせ 時刻合わせ 時刻合わせ	LED	装置番号	
4月5日到着	PM016	済み	起動	〇〇〇〇	拡張基板外れ	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM16
	PM017	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM17
	PM013	済み	起動	〇〇〇〇	背面留め具1つなし	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM13
	PM047	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM47
4月7日到着	PM045	済み	起動	〇〇〇〇	時計2000/1/1	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM45
	PM046	済み	起動	〇〇〇〇	アンテナ切れる	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM46
	PM023	済み	起動	〇〇〇〇	拡張基板外れ SD未入	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM23
	PM031	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM31
5月8日到着	PM048	済み	起動	〇〇〇〇	リセット配線断線	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM04
	PM020	済み	起動	〇〇〇〇	SD差し込み不良	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM02
	PM029	済み	起動	〇〇〇〇	リセット配線断線	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM02
	PM026	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	発送	PM02
5月23日到着	PM011	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	未	PM01
	PM014	済み	起動	〇〇〇〇	SD割れていた! —起動	〇〇〇〇〇〇〇〇	未	PM01
	PM028	済み	起動	〇〇〇〇	SDなし!→起動	〇〇〇〇〇〇〇〇	未	PM02
	PM030	済み	起動	〇〇〇〇	—	〇〇〇〇〇〇〇〇	未	PM03



図8. 研究所屋上での動作確認の様子

3 稲わら焼きの PM2.5 の計測例

3.1 2022年11月3日の観測結果（図9は参考文献[7]の引用）

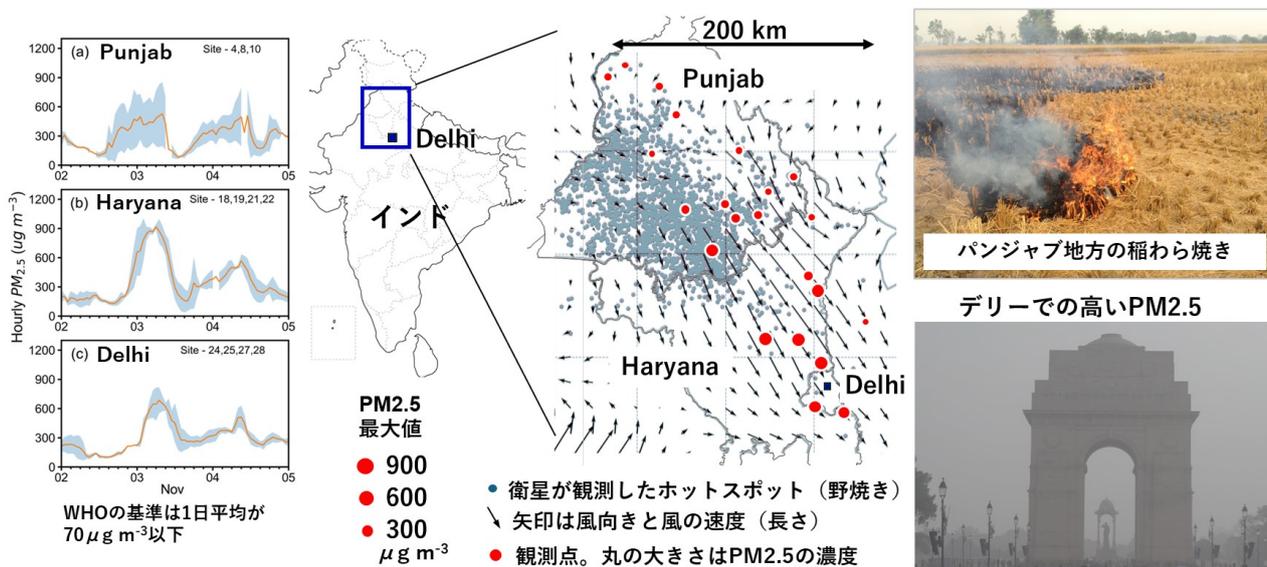


図9. 稲わら焼きの PM2.5 がデリー方面へ流れている様子が分かる

4 まとめ

我々はシンプルかつ簡便、しかし安く正確なコンパクトで高機能な PM2.5 計測装置を開発した。このシステムをインドで使って 30 台を運用した例を示した。インドでは 10 月～11 月の大気汚染が特に酷くこれまで 3 年間にわたりデータを収集できている。追加した UPS システムもほぼ問題なく動いており、稀に動作が停止してしまう Raspberry Pi の対策も今回行った。今後も我々はこの装置を使ってインドの PM2.5 の高濃度な環境を改善したいと考えている。

参考文献

[1] T. Nakayama et al. (2017): Development and evaluation of a palm-sized optical PM2.5 sensor, Aerosol Science and Technology, DOI: 10.1080/02786826.2017.1375078
 [2] Ly Bich-Thuy, Y. Matsumi et al. (2018): Characterizing PM2.5 in Hanoi with new high temporal resolution sensor,

Aerosol and Air Quality Research (2018), DOI: 10.4209/aaqr.2017.10.0435

- [3] 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>) 平成 28 年度 第 12 回名古屋大学技術研修会報告
 - [4] 山崎,岡本,松見, “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”, Homepage (<https://www.tech.nagoya-u.ac.jp/archive/r04/Vol2/honkou/p2.pdf>) 第 2 回東海国立大学機構技術発表会
 - [5] 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
 - [6] 松見豊他 “北インドにおける低コストで自動データ転送する小型大気観測装置の 30 個の展開：Aakash プロジェクト”、第 26 回大気化学討論会（2021）ポスター発表
 - [7] 松見豊、中山智喜, “多数のローコストな小型大気計測器を用いた広域ネットワーク観測に基づく粒子状物質やオゾンの濃度分布や生成・輸送過程の解明と削減対策の推定”、第 64 回大気環境学会年会特別集会 3、大気環境学会誌 第 59 巻 第 1 号(2024 年 1 月 10 日発行) <https://doi.org/10.11298/taiki.59.A66>
- [5]～[7]には謝辞として掲載して頂いている。

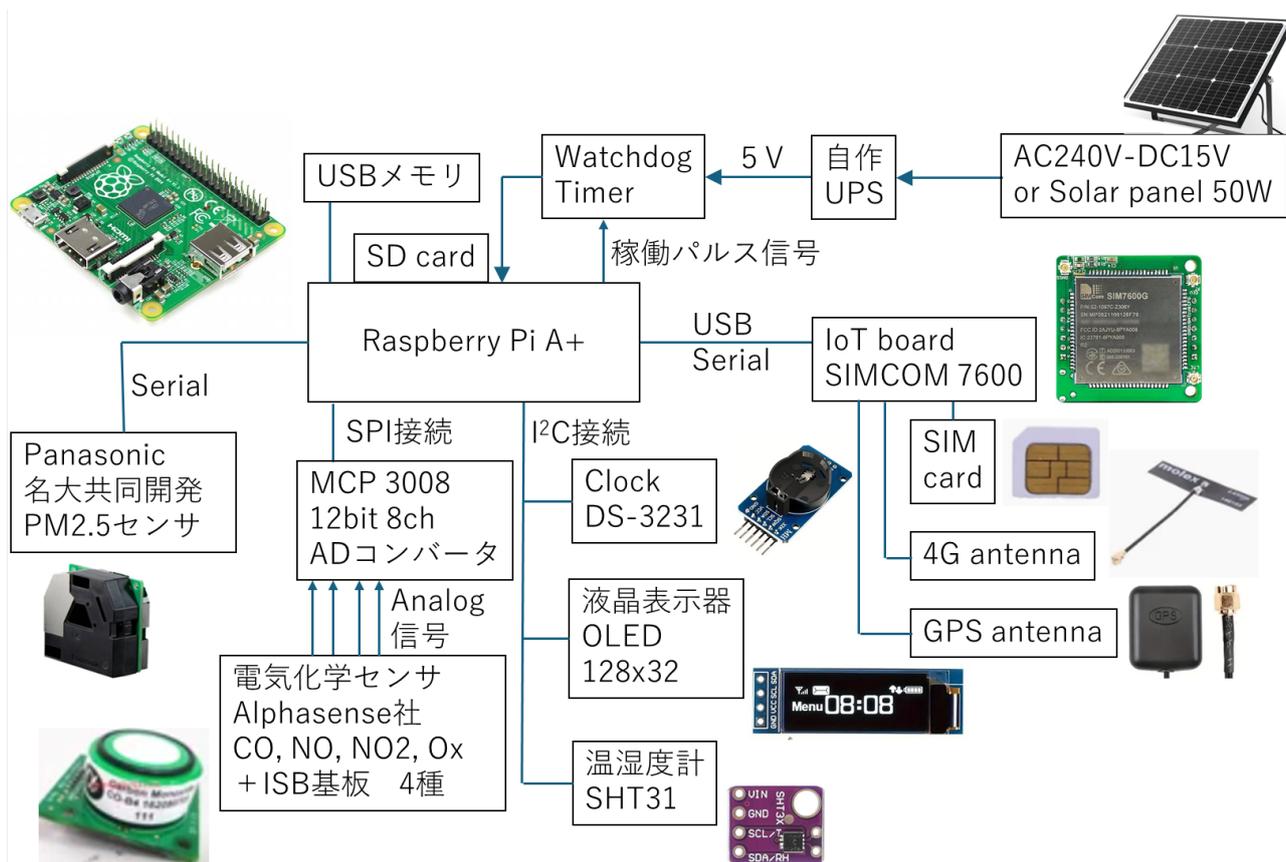


図 10. 装置のブロックダイアグラム