

表3 GNSS アンテナのスペック

Item		Specifications
Antenna	Frequency	High Band L1:1561.098~1602MHz Low Band GPS-L5:1176MHz
	Polarization	RHCP
	Axial Ratio(min)	≤ 3dB (Zenith)
	V .S.W.R	≤ 2.0
	Gain	≥ 2dBic@PCB (Zenith)
	Impedance	50 Ω
LNA	Gain	28 ± 2dB
	Noise Figure	≤ 1.0dB
	Supply Voltage	3.5V DC
	Current Consumption	≤ 45mA
	V .S.W.R	≤ 2.0
Mechanical	Connector	SMA or others
	Cable	RG174
	Mounting Method	Magnet/Adhesive
Environmental	Operating Temperature	-40 °C +85 °C
	Relative Humidity	Up to 95%
	Ingress Protection	IP67
	Vibration	10 to 55Hz with 1.5mm amplitude 2hours
	Environmentally Friendly	ROHS Compliant

表 4 Wi-SUN FAN 通信モジュール BP35C5 のスペック [8]

項目	内容
無線規格	ARIB STD-T108, FCC Part 15C 準拠
無線周波数	920 MHz 帯
変調方式	2 値 GFSK
データレート	ARIB STD-T108:50 kbps, 100 kbps, 150 kbps,300 kbps FCC Part 15C:50 kbps, 150 kbps,300 kbps
伝送電力	20 mW, 10 mW, 1 mW
受信感度	-105 dBm (TYP.) (50 kbps, BER < 0.1 %) -98 dBm (TYP.) (150 kbps, BER < 0.1 %)
周波数偏差	± 20 ppm 以下
消費電流	40 mA (TYP.) [送信 20 mW 出力] 20 mA (TYP.) [受信] (VDD=3.3 V, データレート 50 kbps の場合)
HOST インターフェース	UART(115,200 bps), GPIO

また、本課題の別項目で使用する Wi-SUN FAN 通信に対応したバージョンは、昨年度の事業 [?] で製作したものと外観や基本的な機器構成、性能は全く同一で、日新システムズ社の Wi-SUN FAN 搭載 USB 基板 [7] に用意されているシリアル通信ポート経由で Wi-SUN FAN 通信を行っている。Wi-SUN FAN 搭載基板の無線部分はローム社の Wi-SUN FAN モジュール BP35C5[8] が担っている。このモジュールのスペックを表 4 に示す。

今年度は昨年度の試験の結果を踏まえ、機器としての動作の安定性を目指して細かな改良を加えている。例えば、昨年度の報告書でも記載した EP-ROM の確実な遮光、内部でのケーブル取り回しの改善による信号同士の干渉とケーブル損失の低減、外部アンテナ接続用のコネクタが使用中に次第に中心導体接続部分が緩んで接触不良を起こす不具合が見つかったことから、緩みの原因となっていたコネクタ部分の盤面への固定の機械的強度不足を改善したなどがある。

### 3.3 GNSS add-on の評価

搭載した GNSS add-on が使用できるようにソフトウェアを改修し、その能力を検証した。まず上空の開けた安定した測位が期待できる条件では、従来の内蔵型 GNSS と比較しても測位精度の改善は見られなかった。これは従来の内蔵型 GNSS 自身も L1 のみの 1 周波対応ではあるものの QZSS に対応するなど測位のための機能としては一定の水準を持っており、十分な受信電力が期待できる条件下では良好な測位が行えるためである。

ドローン等に搭載された場合、令和 5 年の国の総合防災訓練の時のように相応の速度で移動しながらの測定も想定される。そこで、より現実的な状況として移動しながら周囲に障害物のある状

態での測定を試みた。具体的には自動車のダッシュボード上に搭載して市街地や郊外で走行しながらの測位品質の改善度合いを確認することとした。この際、内蔵 GNSS を使用する場合は超小型 KURAMA-II 本体をダッシュボード上に設置、また GNSS add-on の場合はアクティブアンテナをダッシュボード上に設置して測定を行った。走行速度は一般道での車の流れに乗った通常の走行速度であり、概ね 40 ~ 60 km/h である。測定は同じりんくうタウンエリアで複数回行っており、都度交通事情等により細かい経路は異なるが概ね同一の範囲、経路をとるようにしている。また一部区間で測位が欠落しているように見えるのは、LTE-M による通信の際のハンドオーバー時にしばしば発生する大幅な通信遅延により送信データが欠落した区間である。

まず、泉佐野市のりんくうタウン付近での代表的な試験結果を示す。図 4 は従来の内蔵 GNSS による測位結果、図 5 は今回の GNSS add-on によるものである。GNSS add-on 採用による効果は一目瞭然であり、Sony が公表している市街地での測位結果同様に大幅な改善が見られ、走行経路である道路をきれいにトレースできていることがわかる。特に内蔵 GNSS では顕著だった交差点等での進路変更や周辺の高架の高速道路や建物等の影響が見られないことがわかる（図 6）。



図 4 りんくうタウン付近における内蔵 GNSS による自動車走行中の測位結果。測定点の赤は同時に調整中だった検出器とのデータ転送同期が外れた場合の空データを意味しており、異常な線量率が観測されたわけではない。



図5 りんくうタウン付近における GNSS add-on による自動車走行中の測位結果。Sony から公開されている測位品質の向上例のように、内蔵 GNSS に比べ大幅な改善が見られることがわかる。

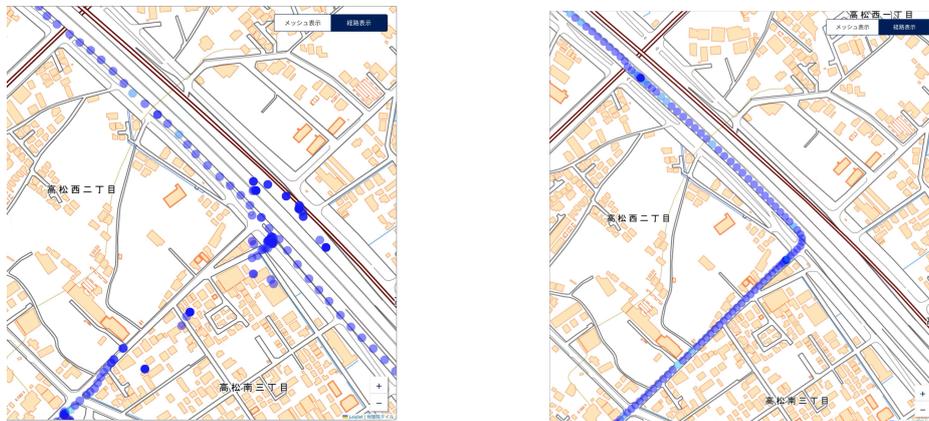


図6 交差点付近における測位の比較。内蔵 GNSS (左) は交差点の上を通過する関空道の影響を受けるなどして測位が乱れている一方、GNSS add-on (右) は影響を受けることなく安定した測位ができていることがわかる。

自動車での安定した測位ができることが確認できたため、さらに高速移動させた場合として南海電鉄のラピートに搭載して測定した。ラピートでは窓側座席の窓付近に超小型 KURAMA-II 本体（内蔵 GNSS の場合）ないしアクティブアンテナ（GNSS add-on の場合）を設置して測定することとした。内蔵 GNSS の場合はほぼ測定が不可能であったが、GNSS add-on では概ね安定して測定することができた（図 7）。



図 7 南海電鉄の特急ラピートに搭載し、泉佐野駅～天下茶屋駅間で測定した際の内蔵 GNSS（左）と GNSS add-on（右）の比較。内蔵 GNSS の場合は測位が可能になるまでに時間がかかることから、ラピートに乗車する泉佐野駅よりも前で動作を開始させたが、ラピートに乗車して設置した後は終点まで測位ができないままであった。一方 GNSS add-on の場合は概ね全区間にわたって測位ができています。一部データがない区間は LTE-M 規格のハンドオーバー時の遅延に伴うものである。

### 3.4 消費電力の評価

GNSS add-on 対応超小型 KURAMA-II はドローンへの搭載が想定されることから、バッテリーを含めた小型軽量化が望ましい。そこで、運用に必要なバッテリー容量の目安を得るため、消費電力測定を行なった。実際の消費電力は LTE-M の通信条件等によっても大きく変わることから、超小型 KURAMA-II を NTT docomo の提供する LTE-M エリア内となる大阪府熊取町の京都大学複合原子力科学研究所敷地内で静置した。検出器として C12137-00HA を接続して、1 秒周期の線量率算出と 20 秒ごとに LTE-M によるデータ送信を行なうという条件で静止状態におけるバッテリー消費を確認した。この時、GNSS add-on では衛星を 15 個程度捕捉して安定した測位が行われている状態であった。

まず、USB バスパワーの消費電流を測定した。この時、すべてのボードおよび検出器への電源供給は 4 ポートの USB-A 出力を持つバスパワータイプの USB-C ハブに集約し、USB 電源とこの

USB-C ハブとの間に USB プロブを接続して電流値を確認した。数値は USB プロブ上で表示される (図 8) ので、これを動画撮影して電流値の変化を見た。通常 0.16 ~ 0.18 A 程度、バースト状に 0.20 ~ 0.23 A 程度であった。USB バスパワーの電圧は 5 V なので、消費電力は 0.8 ~ 1.2 W 程度とみられる。



図 8 USB バスパワー測定の様子。プローブ上に USB バスパワーの電圧、電流がリアルタイムで表示される。これを動画撮影して電流値の変化を評価した。

次に長時間連続稼働させた際の平均消費電力を評価した。定格容量 3.7 V 5000 mAh、出力 12 W のモバイルバッテリーを満充電にして、これに超小型 KURAMA-II を接続して動作させ、LTE-M 経由で送信されたデータがサーバで受信できなくなった時点でモバイルバッテリーが空になったとして連続稼働時間を 13.5 時間と決定した (図 9)。バッテリーの出力は 12W であることから、USB バスパワーの電圧は 5 V であることから、平均消費電流は 0.18 A、平均消費電力は 0.9 W となった。この結果は USB バスパワーから求めた結果と矛盾しない。

### 3.5 高線量率に対応した検出器の検証

Spresense ベースの超小型 KURAMA-II は浜松ホトニクス社 C12137 シリーズに電氣的に対応しており、適切な G(E) 関数を実装することで任意の C12137 シリーズを実装することができる。その

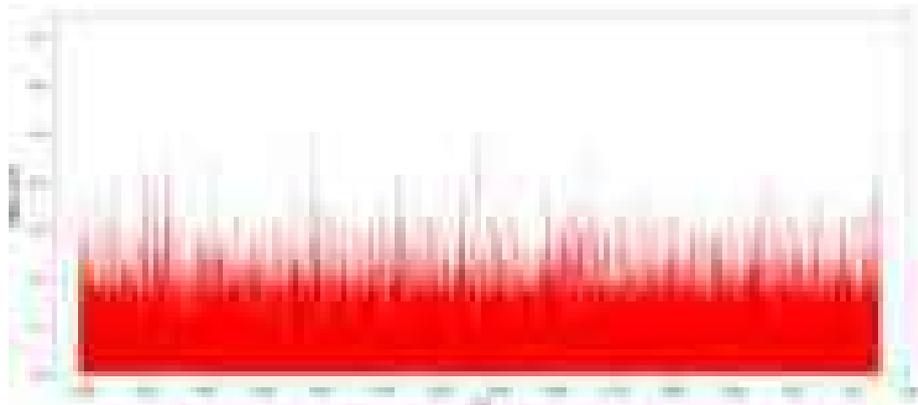


図9 定格容量 3.7 V 5000 mAh、出力 12 W のモバイルバッテリーで稼働させた際に受信した線量率のトレンドグラフ。このグラフから途中のデータ欠落がないことを確認し、連続稼働時間を13.5時間と評価した。

ため、C12137 シリーズのフレームワークで目的に応じた様々な仕様のシンチレータを実用化することは Spresense ベースの超小型 KURAMA-II の活用範囲を広げることにつながる。

これまでの規制庁委託事業においても様々な仕様のシンチレータを実用化してきた。その中で原子力災害を想定した  $\sim 100$  mSv/h 程度の高線量率と相応のダイナミックレンジを持つ検出器の実用化を要望する声が高かったことから、40 mSv/h 程度までの測定に対応した GAGG 及び CsI(Tl) 検出器が製作できることを確認した [10]。当時の実証試験で使用した照射施設は FRS だったため、施設の上限である 40 mSv/h 以上の検証ができていなかった。浜松ホトニクスではこの試験の結果を踏まえて 3 mm 角の CsI(Tl) シンチレータを搭載した実用的な試作品の開発が進んだことから、今回 100 mGy/h まで照射可能な JAEA 核燃料サイクル研究所線量校正施設において CsI(Tl) 3mm 角及び GAGG を搭載した C12137 シリーズ試作品について照射試験を行ってその能力を検証した。

照射条件としては、バックグラウンドレベル、10, 20, 50, 100, 200 mGy/h と計数率の飽和の肩付近での数点としたが、線量校正施設での校正済み最大照射量が 110 mGy/h までだったため、バックグラウンドレベル、10, 20, 50, 100, 110 mGy/h を照射した。計数率の飽和の肩が 20 mGy/h $\sim$ 110 mGy/h でおおむね見えたため、0.01, 0.1, 1, 2, 4 mGy/h の照射を行った。さらに校正範囲外となるが検出器の設置箇所を 60 mm 前方にずらして 110 mGy/h の照射をすることで約 120 mGy/h の照射を行った。その結果及び前回の FRS での結果をまとめたものを図 10 に示す。

この結果から 100 mGy/h をこえる直線性が確保できていることが確認されたが、不感時間による計数率の飽和において CsI(Tl) と GAGG でほぼ同一であることが判明した。シンチレータの特性としては GAGG の発光時間の短さから CsI(Tl) に比べて計数率の飽和が起きにくいと考えられるため、シンチレータ以外の原因であると考えられた。浜松ホトニクスとの協議の結果、アナログ及びデジタルの信号処理系の問題で 15  $\mu$ sec 程度の不感時間が発生していること、GAGG の高計数率を活かすためには回路系の大幅な変更が必要になる可能性が高いことが判明した。このため、線量率測定範囲

の拡大という観点では、現状の C12137 シリーズをベースとした検出器では GAGG の採用をするメリットはあまりないと考えられる。ただし、例えば耐環境性の観点からは潮解性の全くない GAGG の採用にメリットはあると考えられる。なお、浜松ホトニクスが 3 mm 角 CsI(Tl) 搭載の実用化試験機を試作したため、後日実用化試験機について JAEA 核燃料サイクル研究所で 200 mGy/h（ただし校正範囲外）の照射も行なったが、計数率の飽和について変化はないことを確認した。

### 3.6 考察とまとめ

昨年度の事業で試作した Spresense ベースの KURAMA-II について、動作の安定性を向上させるとともに LTE Cat. M や Wi-SUN FAN への対応を行なった。この成果をもとに実際のユーザによる実際の活用に向けての取り組みも進んでいる。今後はユーザの活用の取り組みを支援するための開発や改良を継続するとともに、機材の普及に向けた量産化などへの取り組みを継続したい。以上のように GNSS add-on の採用で、市街地での移動中や高速移動時において従来の超小型 KURAMA-II と比較して明瞭な測位品質の向上が確認できた。以上を踏まえると、GNSS add-on を採用することで、自動車走行サーベイやドローンで飛行しながらの放射線計測を行う場合は GNSS add-on の採用が強く推奨される。一方、従来の内蔵 GNSS も上空のひらけた場所で静置した場合には十分な能力を発揮し、GNSS add-on との差は見られなかった。そのため、測定中の移動が想定されない可搬型・固定型モニタリングポストによる計測のような場合は内蔵型でも十分な能力を発揮すると思われる。

今回の事業で想定していた Sony Spresense 用 IMU add-on については、2025 年 2 月 28 日に「マルチ IMU アドオンボード」として一般向けの供給が開始された [9] ため、本課題の委託期間内での検証はできなかった。これは 3 軸加速度センサーおよび 3 軸ジャイロスコープで構成される 6 軸 IMU ボードで、16 個の民生 MEMS IMU 出力をマルチ IMU 合成技術により合成することで、低価格でありながら地球自転検出可能な低ノイズ密度や工業用ジャイロスコープに匹敵するほどのバイアス安定性出力を実現している。さらにこのボードを 2 つ同時使用することでさらなる精度向上も可能とされている。GNSS の電波が届きにくいと思われる森林や山間部、高層ビル群のエリアや地下街、屋内での活用の可能性がある。参考までに IMU add-on のスペックを表 5 にまとめる。

表5 IMU add-on の主なスペック [9]

項目	仕様
ダイナミックレンジ	ジャイロ： $\sim \pm 4000$ dps 加速度： $\sim \pm 16$ g
ノイズ密度	ジャイロ： $1.0$ mdps/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (2枚スタック時： $0.7$ mdps/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) 加速度： $14$ $\mu\text{G}\sqrt{\text{Hz}}$ (2枚スタック時： $9.8$ $\mu\text{G}\sqrt{\text{Hz}}$ )
バイアス安定性	ジャイロ： $0.39$ dph (2枚スタック時： $0.27$ dph) 加速度： $4.43$ $\mu\text{G}\sqrt{\text{Hz}}$ (2枚スタック時： $3.13$ $\mu\text{G}\sqrt{\text{Hz}}$ )
出力レート	最大： $1920$ Hz
電源電圧	$4.0\text{V}$
消費電流	最大 $50$ mA (2枚スタック時： $104$ mA)
動作温度範囲	$-20 \sim 65$ °C
基板寸法	$50.0 \times 20.6 \times 9.1$ mm
重量	$9$ g

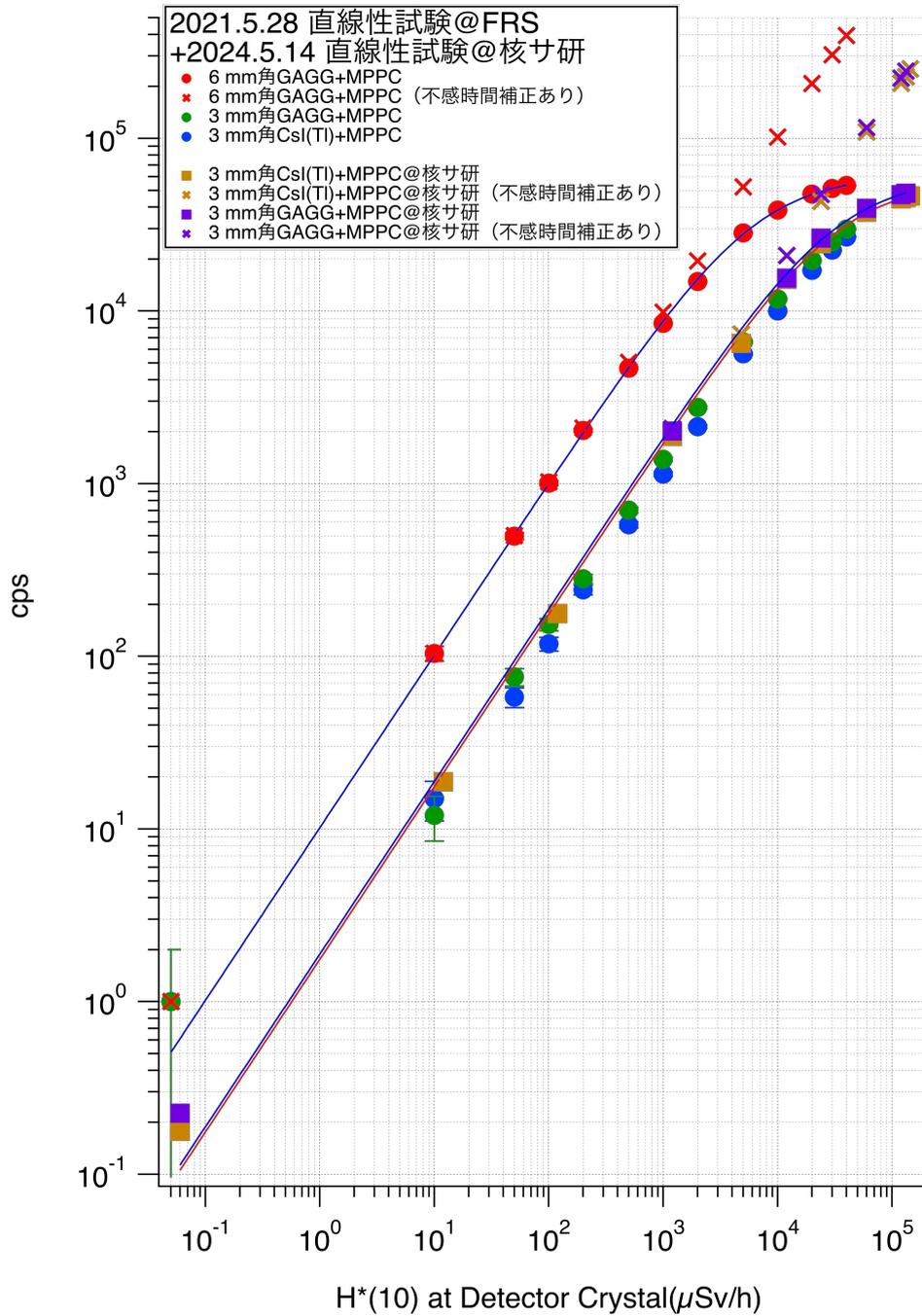


図10 今回の事業で行った3 mm角CsI(Tl)及びGAGGの直線性測定の結果と、前回のFRSにおける結果。今回の試験は前回のFRSの試験結果と矛盾しない結果となり、かつ不感時間の補正を行うことで100 mGy/h以上の直線性が確保できることが確認された。