

【研究論文】

【平成30年度～令和2年度 地域企業競争力強化支援事業】

IoTを用いたモノづくり工程管理高度化のための要素技術開発

中居 倫夫, 小野 仁, 今井 和彦, 荒木 武, 小泉 協^{*1}, 高野 寛己, 林 正博,
高田 健一, 沼山 崇^{*2}, 坂下 雅幸, 佐藤 裕高
機械電子情報技術部
(*1現 新産業振興課, *2現 企画・事業推進部)

近年進展著しいIoT技術やロボット技術を活用してモノづくり企業の製造工程を高度化することは、製造歩留まりと製品品質を大きく改善し得る手法として期待され、企業の競争力を高める手法として取り組みが始まっている。当該技術を県内モノづくり企業の工程管理に導入することは、県内企業の競争力強化に大きく寄与できるものであるが、その一方で、中小企業においては、開発期間の短縮・開発リスクの低減への要求から、導入の取り組みに時間を割けない現状である。

そこで、今後、企業での導入が本格化すると予想されるIoT技術について、当センターが先導的な技術開発を行い、関連する領域の基盤技術を確立することで、中小企業の効率的なIoT導入の支援につなげることが可能になる。このような目的のもと、本研究は、モノづくり企業のIoT化推進を促進する技術領域の要素技術開発として取り組まれた。①工程の見える化 ②設備保全の無線センサ化 ③工場内電磁ノイズ(EMC)対策 の3つの領域について、企業連携や産学官連携を活用して実施された研究成果について以下にまとめる。

キーワード：製造工程スマート化, IoT化, 工程監視, 設備保全, 無線ネットワーク, 振動発電, 電磁ノイズ, EMC

1 緒言

近年のIoT技術の進展に伴い、モノづくり企業の製造工程にIoT技術やロボット技術を導入して工程を高度化し、製造歩留まりと製品品質を大きく改善するシステムが注目されている。このような中、当センターでは地域企業と連携して、産学官連携のもと、企業のIoT化を推進する目的で本研究に取り組んだので報告する。

本研究では、モノづくり企業の製造工程に適用するIoT技術として、以下の3課題に取り組んだ。

- [1] 工程における加工直後の仕掛品の全数検査を可能にするセンシング技術(「モノづくり工程の見える化」)
- [2] 工場内で可動しているモータ等動力装置の設備保全の無線センサ化(「設備保全の無線センサ化」)
- [3] IoT無線システムを正常に動作させるための工場内の電磁ノイズ(EMC)対策(「工場内電磁ノイズ(EMC)対策」)

これらの技術は、県内モノづくり企業の工程管理に導入することで、製造工程のIoT化と高度化に大きく寄与できる技術である。中小企業では開発期間の短縮や開発リスク低減が求められており、今後、企業での導入が

本格化すると予想されるIoT技術について、当センターが先導的な技術開発を行うことで、製造工程をスマート化するための基盤技術を確立し、効果的な中小企業のIoT化支援につなげることを目的に実施した。

本論文は、前述の3つの課題の各々を1つの章として構成するとともに、課題毎のサブテーマを節として構成して報告している。既に公開された論文等の内容については、概要を示すにとどめ、公開文献をリファレンスとして表記している。

2 モノづくり工程の見える化

本課題では、これまで目視検査で行われていた製品検査を自動化/IoT化することを目的に、工具割れ等の破片が製品内に混入したことを検出する異物検査システムの開発、そして、画像処理を用いた製品外観検査技術の開発を実施した。ここでは、製造工程の途中で、ベルトコンベヤ等で搬送中の製品を全数検査できる、非破壊検査と外観検査とを複合化した検査システムの実現を開発イメージとして取り組んだ。以下に各サブテーマの研究成果を示す。

2.1 磁気式異物検査装置の開発

2.1.1 静磁場方式の異物検査装置(開発の概要)

粉碎機や加工工具の破片など製造装置の微小な欠損部材を検出することは、製造品への異物混入による不良品発生を防ぐほか、製造装置の破損発生を迅速に検出して不良品の拡大を防ぐ目的でも重要である。本研究では、このような磁性破片を検出するための静磁場式検査装置の実現を目指している。静磁場方式は、渦電流が測定の妨げになる金属管体内部や電気回路基板上、あるいはこれに隣接した領域の検査が可能である。この開発では、ベルトコンベヤを流れる小型の製品と、大型の樹脂部品やアルミ鋳物の製品検査に対応できるものと、2種類の検査装置のプロトタイプを開発したので報告する。

2.1.2 開発の内容と成果

はじめに、提案する磁気式異物検査装置の概要を示す。図2-1-1に装置の概略を示す。本装置は強い磁場領域中に被検査物を通過させて異物を磁化させると同時にこれをセンサで検出する。異物が強磁場領域を通過する際、磁場で磁性異物が磁化されてここからの漏れ磁場が生じる。提案装置の磁気センサは薄膜軟磁性体で作製されたセンサであることから、膜厚方向の反磁界の効果に起因して膜厚方向に印加された磁場が相殺されてセンサが感じる磁場は見かけ上小さくなる。この効果を利用して装置の強磁場中に置かれたセンサの膜面法線方向と印加磁場の方向が一致するように配置することで、強磁場の中にありながら高感度を維持した検出装置が構築可能である。

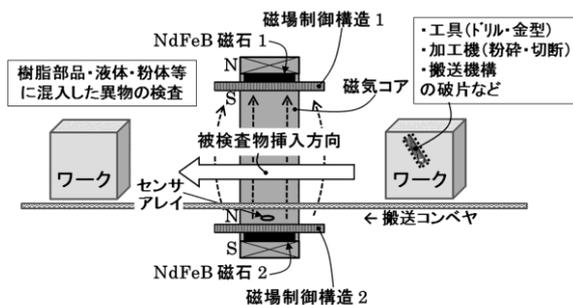


図 2-1-1 異物検査装置の概念図

図2-1-2は、垂直方向磁場の発生に磁石を使い、これを口の字型の磁気コアの上下両側に配置することで検出領域に強い磁場を発生させる磁場発生装置と薄膜磁気センサを組み合わせた検査装置の主要部を示した図である。本図の検出領域は、口の字型の内側になる。薄膜センサは、磁石の磁極面の直上部に、膜面と磁場方向が直角になるように配置してある。NdFeB磁石の表面磁束密度は最大で0.55T程度であるが、一般的な平板形状では0.35T程度以下であるため、ここで使用するセンサは性能的に磁石面の直上に設置可能である。この確認実験は、図2-1-3と図2-1-4に示す実験装置を用いて行われ、別報にまとめている¹⁾。このセンサの配置は、上下方向の検査領域を広く取る意味でも有効であり、磁化した異物を最大磁化位置の直近で検出できるため高感度化できる。このことは、広い領域で微細な異物を検出する目的に適していることを意味する。

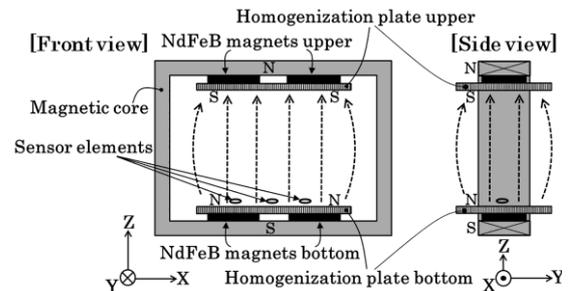


図 2-1-2 異物検査装置の主要部の構造

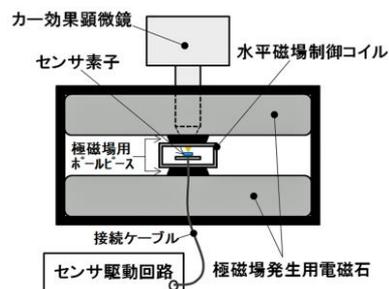


図 2-1-3 強磁場中のセンサ特性評価装置概略図¹⁾

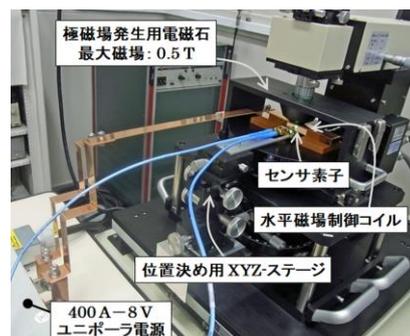


図 2-1-4 強磁場中のセンサ特性評価装置写真¹⁾

著者らは、センサ膜面に垂直方向の強磁場を印加しても感度を失わない磁気センサとして、高感度な薄膜磁気インピーダンスセンサ¹⁾を用いている。このセンサは、微細成形した薄膜の微小ストリップに高周波を通电して、センサに印加された外部磁場の変化を素子のインピーダンス変化として検出するセンサである。センサ素子は、当センターのクリーンルームで試作した。センサ素子の試作工程は、実用化の際にスムーズに企業移転できるよう、良好なセンサ特性が再現性良く試作できるプロセス条件を検討してある。

センサ素子に通电する高周波は、数百MHzの高周波でセンサ感度が最高感度になるため、この周波数でセンサを駆動してインピーダンスの変化を電圧出力の信号として出力するためのセンサ駆動回路を提案した²⁾。ここでは、400MHzの高周波信号を1段で検波して振幅に比例した電圧信号を出力できるログアンプ(Logarithmic amplifier)を活用して、シンプルな構成の回路でnT(ナノテスラ)オーダーの磁場変化をリアルタイムの磁場波形として観測できるセンサ駆動回路を開発した。特性インピーダンスを適正值に調整した高周波プリント基板に実装されたセンサ素子の写真を図2-1-5に、センサ駆動回路のブロック図を図2-1-6に示す。本研究では、これらを用いてシステム構築した。センサ駆動回路の詳細は参考文献2)にまとめている。

図2-1-2の磁気式異物検査装置を構築する際に、強磁場のレイアウトが高感度センサの配置に大きな影響を与える。例えば、本図の磁石配置では、片側に2個のネオジウム磁石を配置しているが、個々の磁石の縁辺部で

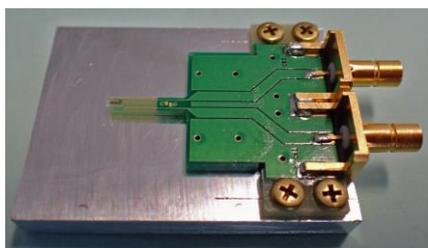


図 2-1-5 基板に実装されたセンサ素子の外観

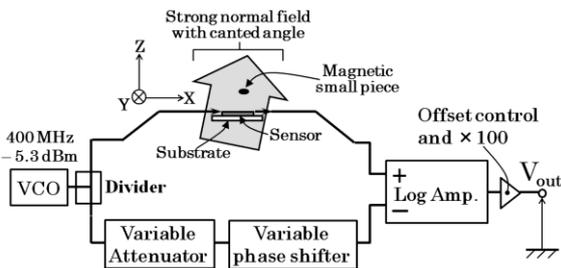


図 2-1-6 センサ駆動回路のブロック図²⁾

はエッジ部の効果により磁場の乱れが発生する。この部分では強い磁場がセンサの検知方向や膜面の横方向から入射するため、センサ素子には過酷な状態となってセンサ感度を維持できない。この問題を解決するために、磁石上に磁場均一化板を設置することが有効であることを示した。磁場均一化板の有効性を示す図を図2-1-7に示す。本図は磁場ベクトルが鉛直方向に揃っている様子を示している。この技術に関しては特許出願している³⁾。

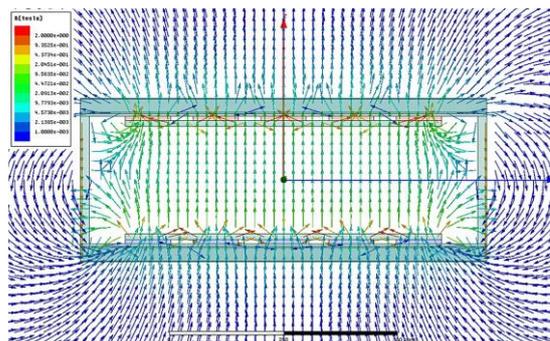


図 2-1-7 磁場均一化板の有効性を示すベクトル図(磁石 5 個の場合)

これら3つの開発技術を組み合わせて、磁性異物の混入を検査する装置を構築した。図2-1-8は検査領域の開口幅が250mmの小型部品用検査装置の磁場発生装置とセンサである。この装置には、磁場均一化板の直上に3チャンネルのセンサが60mm間隔で配置されており、これらのセンサで、数ミリメートル立方程度の工具鋼破片であれば、検査領域である開口幅250mmの通過を見逃し無く検知できることが示されている。

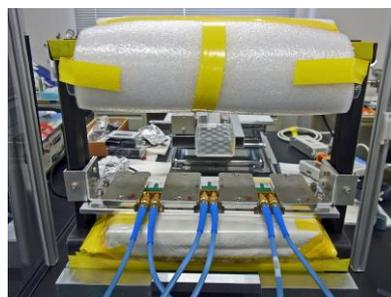


図 2-1-8 磁場発生機構とセンサ(装置主要部)

図2-1-9は、搬送コンベヤを一体化した検査装置のプロトタイプである。ここで使った搬送コンベヤは、安価に購入できる汎用品のコンベヤであり、ボディはアルミ製、搬送ベルトは樹脂製、磁気センサのある測定部と反対側のコンベヤ端部に出力25Wのスピードコントロール可能なモータが一体化されている。回転ローラーの

ベアリングとボルト・ナット類は磁性のある鋼製である。ネオジム磁石を用いた強磁場の発生機構と3チャンネルの高感度磁気センサの位置関係は、磁場の乱れに敏感であるが、本装置では、コンベヤの設置の前後でセンサ位置の調整を行わなくても問題なく装置が動作したことから、コンベヤによる磁場の乱れは影響が無視できる程度であり、システム構築に問題にならないことが確認された。



図 2-1-9 コンベヤを一体化した検査装置プロトタイプ(開口幅 250mm の小型装置)

この検査装置に、工具鋼破片(φ4.5×H5.0mm)を通過させた場合のセンサの出力波形を図2-1-10に示す。図に示す山と谷のある波形は鉛直方向に磁化された磁性体が水平に通過した場合にセンサで検知される磁場信号の特徴である。本センサ検出回路では、センサ出力がおおよそ0.1Vで検出した磁束密度1mG(10⁻⁷T)に対応することから、本図の測定条件では、図のPeak levelで約10mG(10⁻⁶T)の磁場信号が検出されている。この場合の工具鋼破片の通過高さは、均一磁場板を基準にして80mmである。

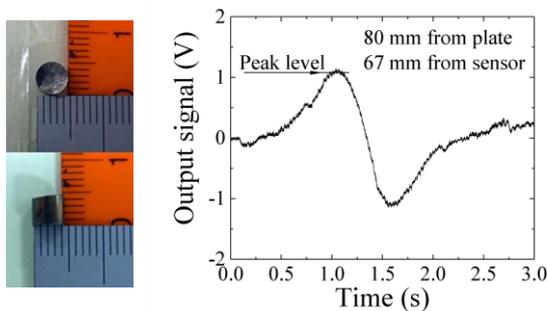


図 2-1-10 工具鋼破片と検出波形⁴⁾

この工具鋼破片について、通過高さでセンサ出力の関係を示した図が図2-1-11である⁴⁾。本図から、高さ方向も100mm程度までの広い範囲で検出可能であり、口の字型の磁場発生機構の上下にセンサを設置すれば開口領域全体を検査可能であることが推測できる。

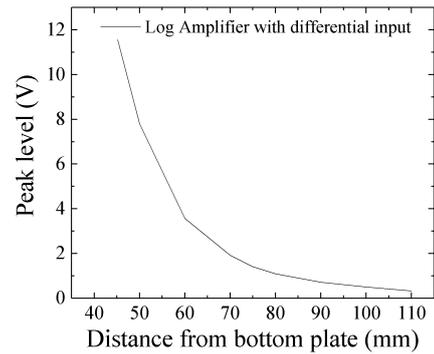


図 2-1-11 検出波形の Peak level の試験片高さ依存性⁴⁾

図2-1-12は、開口幅900mm、開口高さ210mmの大型の試作装置の写真である。本装置は磁場発生部にW100mm×D100mm×T20mmのネオジム磁石を6個×3列=18個を上下に配置して、合計36個の磁石を使用している。この装置では、開口部内部にある上下の磁場均一化板の間隙部における幅600mm×奥行き400mm×高さ140mmの領域内部で、370G±10%の均一な磁場が形成されており⁵⁾、⁶⁾、この装置を使うことで、図の写真に示すような大型複雑形状のアルミ鋳物内部にある工具鋼や金型鋼の破片を検出できることを実証した⁷⁾。

現在、このシステムに設置したセンサは1チャンネルのみであるが、装置の磁場分布は多チャンネルをアレイ状に設置できる構造になっており、今後は、複数のセンサを取り付けて、これらからの信号を演算することで、異物の位置・サイズの検出を実現するなど、システムの完成度を高めていく所存である。



図 2-1-12 開口幅 900mm の大型の試作装置写

今後は、開発した検査装置の更なる用途開発を行い、応用領域を拡大する普及活動を行う予定である。

(本節の文責 中居 倫夫)

2.2 画像処理式外観検査

画像処理式外観検査の分野では、目視による外観検査工程での熟練技術者の勘と経験に頼った判別を定量化・自動化するため、分光画像計測技術に着目し、令和元年度に「AI併用型ハイパースペクトルカメラ」(エバ・ジャパン(株)製NH-8及びSIS-I, Future Processing社製Adaptive Vision Studio)を導入した。具体的な技術支援への活用と展開に向けて、ハイパースペクトルカメラとAIの連携によるインライン検査を想定した外観検査技術を開発した。

図2-2-1に開発したシステムの模式図を示す。外観検査用AIシステムでは、製造ラインのベルトコンベア上を流れてくる製品のインライン検査を模して、自動回転ステージ上に複数の模擬サンプルを設置し、マシンビジョン用の汎用カメラ(Basler製acA2440-20gc)真下を通過するタイミングに同期して画像を撮影しNGサンプルを検出することが出来る。検出に当たっては、AI画像処理ソフトウェアを用いて、事前に撮影した類似のNGサンプルの特徴をDeep Learning(以降、DL)で学習させておくことで、ルールベース処理と組み合わせた柔軟な検査が可能である。

ここで、検出精度を向上するには、光学系を工夫し、NGサンプルの異常部分が明瞭に撮影された画像を取得し学習させることが極めて重要であるが、異常部分が測定波長に応じて急激に変化する反射特性をもつ場合、図2-2-1下側のようにハイパースペクトルカメラによる分析を通じて適切な波長フィルターを選定し、AIシステム側の汎用カメラに装着することが、コストや検査速度の面も含め有力な選択肢となる。

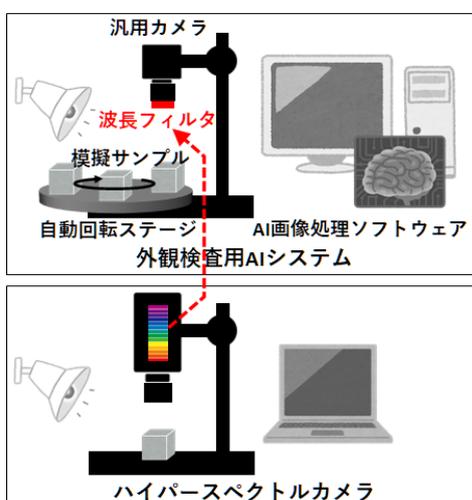


図 2-2-1 開発したシステムの模式図

以降、開発したシステムによる具体的な外観検査事例を示す。図2-2-2のように、外観検査用AIシステムの自動回転ステージ上に模擬サンプルとして端子ボックス部品8個を設置し、うち1個は外観NG品として中央部分にX字状の疑似汚れを付着させているが、この汚れは透明に近いため目視や汎用カメラでは良く見えず、ルールベース処理では閾値の設定が困難で、AI画像処理ソフトウェア(Adaptive Vision Studio)のDLで学習させた場合でもOK品として誤判定してしまう。

検出精度の改善に向けて、ハイパースペクトルカメラ(NH-8)にてNGサンプルに付着した汚れの波長特性の分析を試みた。本カメラは波長範囲380-1,000nmにおける5nm毎の輝度画像を1スキャンで一度に取得できるが、その中から一例として2つの波長での輝度画像を図2-2-3に示す。波長500nmでは汚れ成分は全く見えないが、波長400nmではX字状の汚れが黒く鮮明に見えており、この汚れが同波長で吸収を持つことを示している。

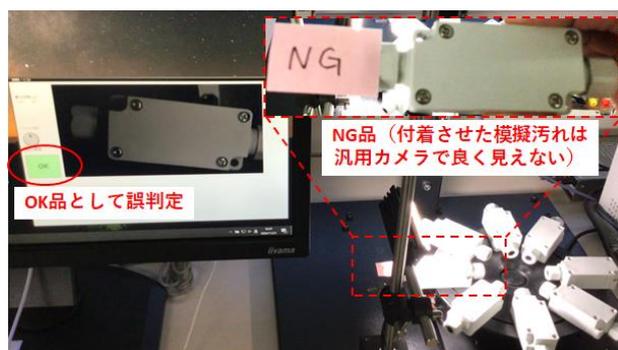


図 2-2-2 外観検査事例(波長フィルタ適用前)



図 2-2-3 ハイパースペクトルカメラでの分析

この分析結果を踏まえて、外観検査用AIシステムの汎用カメラに中心波長400nmの波長フィルター(Edmund Optics製OD4.0 25nm バンドパスフィルター)を装着し、改めて類似のNGサンプルを撮影しDLで再学習させた上で、同様の外観検査を試みた。

結果、図2-2-4に示す通り、NGサンプルを正しく判定することができ、その判定根拠となる部分も図2-2-3の400nm輝度画像による汚れ部分と合致している。なお、残る7個のOKサンプルについても、全て正しく判定することができている。

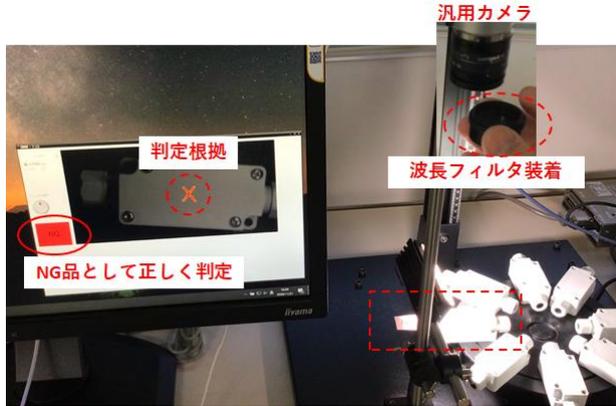


図 2-2-4 外観検査事例(波長フィルタ適用後)

以上、ハイパースペクトルカメラとAIの連携による、インライン検査を想定した外観検査技術を開発し、その有効性を確認した。今後、よりDLが効果を発揮するような多様なサンプルを追加測定し検査精度を詳細に検証することで更なる性能向上を図り、得られた知見やノウハウを企業支援に活用する予定である。

(本節の文責 荒木 武)

3 設備保全の無線センサ化

本課題では、設備保全のIoT化を推進することを目的にして無線センサを活用するための要素技術開発を行った。具体的には、IoT体験キット⁸⁾をモジュール化し、それらを組み合わせた各種の低消費電力型の無線ユニット提案。IoT体験キットと組み合わせ容易な環境発電ボードの開発。そして、環境発電体の価値を高める一体化環境発電ユニットの開発を行った。また、高効率な振動発電セルとして磁歪発電と電磁誘導を複合化した発電構造を提案した。

3.1 IoT体験キットのモジュール化と普及

3.1.1 IoT体験キットのモジュール化

本研究では、無線センサとして、コイン電池で動作し、無線デバイス及びセンサの変更が容易な IoT 体験キットを用いたが、その改良も行った。

ハードウェア面では、当初はブレッドボード上で部品

を組み合わせていたのに対し、電源、センサ、マイコン、無線デバイス毎に専用の基板を設計し、これらのインターフェースを共通化することにより、コンパクト化、堅牢化、使いやすさの向上を実現した(図 3-1-1)。

オプション

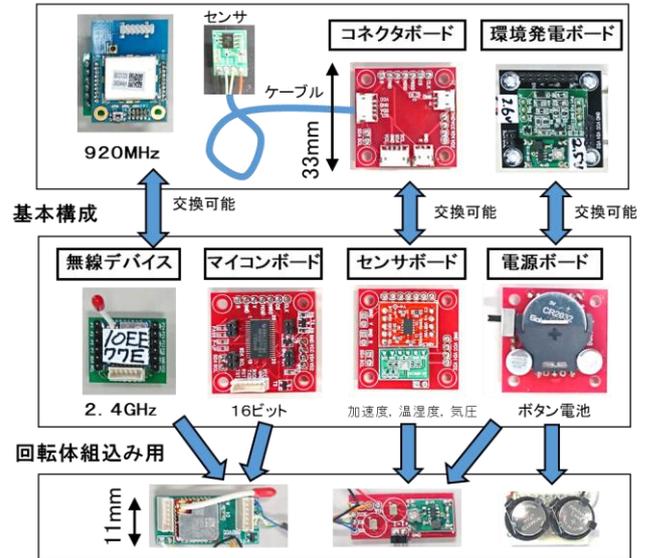


図 3-1-1 改良した IoT 体験キットの各モジュール

ソフトウェア面では、基本仕様、ON/OFF検知用、高速測定用の3種類のバリエーションを構築した⁹⁾。また、得られた多数のデータを可視化するための手法を開発した¹⁰⁾。

これらの改良により、使用目的に応じた多様な展開が可能となった。

3.1.2 モジュール化した IoT 体験キットによる展開

3.1.2.1 屋内の温湿度計測

宮城県林業技術総合センターと共同で室内の長期間に渡る温度計測を実施した(図 3-1-2)。

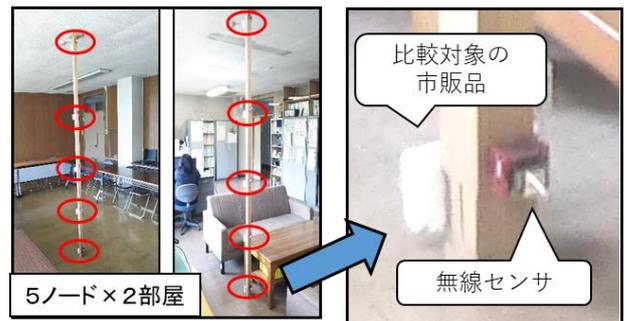


図 3-1-2 林業技術総合センターでの設置状況

この計測では基本構成のIoT体験キットによる無線センサを用い、100秒に1回の温湿度測定を行うことにより、複数年に渡る測定を実施中である。

3.1.2.2 恒温恒湿槽内の温度分布計測

当センターの恒温恒湿槽内の温度分布を計測した。この計測では150℃の温度に耐えられるセンサ部のみを恒温恒湿槽内に設置する必要があったので、無線センサはIoT体験キットのセンサボードをコネクタボードに変更し、コネクタボードにケーブルを介して温度センサを取り付ける仕様とした(無線温度計測システム)。本計測結果については、参考文献11にまとめている。

3.1.2.3 工場内の機器のON/OFF計測

東北特殊鋼(株)と共同で、工場内の機器の稼働状況の見える化を試行中である。これは、工場内に複数ある熱処理炉の稼働状況を遠隔からモニタリングすることにより、管理コストの低減を目指すものである。

無線センサは、IoT体験キットのセンサボードをコネクタボードに変更し、コネクタボードから伸ばしたケーブルをシグナルタワーに直接取り付けて機器のON/OFF情報を取り出している(図3-1-3)。

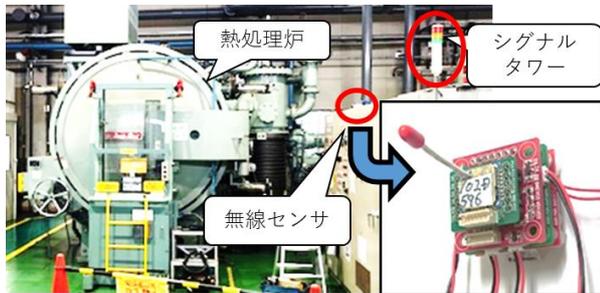


図 3-1-3 熱処理炉のモニタリング状況

3.1.2.4 回転式工具ドリル先端部の温度測定

当センターの切削加工装置のドリル先端部の温度計測を実施した。この計測ではドリル先端部という狭小な領域の温度を測定するため、中央に穴の開いたドリルを利用し、この中に超小型の熱電対を配置した。無線センサはドリルのツールホルダ内に配置できるようにIoT体験キットを再設計し、さらにコンパクト化した回転体組込み用の構成を開発した。ソフトウェアも高速測定用に仕様変更した⁹⁾。本計測結果については、参考文献12にまとめている。

3.1.3 環境発電ボードの開発

モジュール化したIoT体験キットを環境発電により動作させるため、環境発電ボードを開発した。

環境発電ボードの回路の一部には、当センターが開発した蓄電回路¹³⁾を用い、発電体の発電電圧に応じて複数のVH(放流開始電圧)を選べるようにした。また、インターフェースはIoT体験キットの電源ボードと共通化した(図3-1-4)。

これにより、振動発電に限らず、温度差、室内光等、様々な発電源からの電力供給が可能で、かつ電源がボタン電池から簡単に交換できる無線センサが構築できるようになった。

3.1.4 環境発電ボードによる展開

福田結晶技術研究所(株)は、鉄ガリウム系の振動発電体を開発しているが、これを展示会等でデモンストレーションするための装置を必要としていた。

そこでIoT体験キットと環境発電ボードを組み合わせたデモンストレーション用の装置を開発し、技術改善支援により提供した。

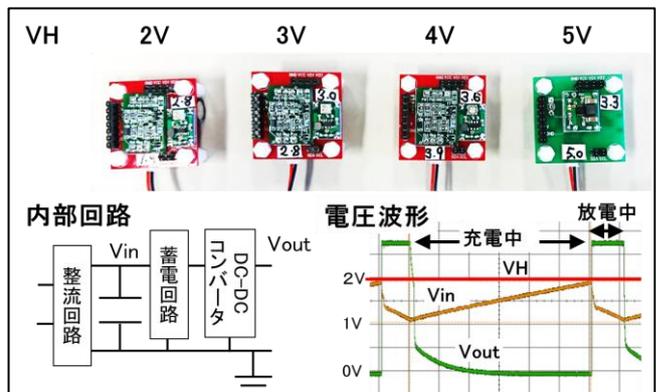


図 3-1-4 環境発電ボード

他に、東北大学産学連携先端材料研究開発センター等、環境発電とIoTが関係する4件の企業・機関からの技術支援の要望に対し、環境発電ボード単体、若しくはIoT体験キットとの組み合わせにより対応した。

3.1.5 環境発電ボードの環境発電体との一体化

環境発電体は、発電体の特性により発電する電圧や電流が異なり、また、振動の大きさにより発生する電力も様々である。一方でIoT機器に対しては、測定から無線送信を行うまでの1回の動作サイクルの間、一定の電圧

で電力を供給する必要がある。

環境発電体と環境発電ボードを一体化して環境発電ユニットとすることにより、環境発電体が手軽に利用できるようになり、発電体の価値が向上すると考えられる。

そこで、東北特殊鋼(株)と共同して、一体化環境発電ユニットの開発を行った。東北特殊鋼(株)からは、自社開発した鉄コバルト系磁歪発電体を活用したコンパクトな磁歪発電体が提供され、当センターでは、この発電体のケースに収められるように環境発電ボードのカスタマイズを行い、複数回の試行の後、ケース内に納める事に成功した(図 3-1-5)。

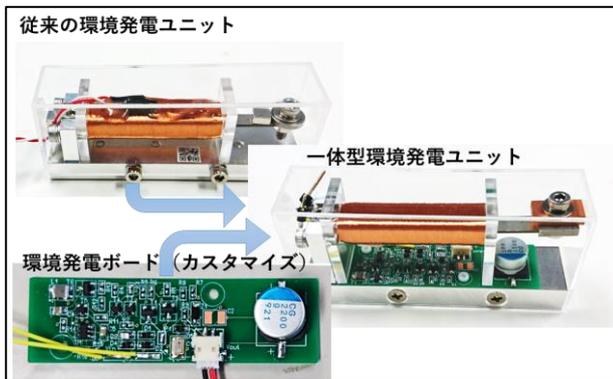


図 3-1-5 一体型環境発電ユニット

(本節の文責 小野 仁)

3.2 高効率な振動発電セルの開発

工場内部で使用される無線センサは、高所や狭隘部に設置されることも想定されており、センサや無線ユニットの動力源として電池を使った場合には、電池交換が困難になる可能性が指摘されている。本研究では、電池を使わずにユニットを設置した環境からエネルギーを回収する「エネルギーハーベスティング」の技術を使った無線センサユニットを開発すべく、高効率な振動発電セルの研究開発を行った。中規模の製造工場において、工場内におおよそ1,000台程度のモータが稼働していると言われており、本課題では、無線センサユニットの動作電力をモーターハウジングや製造装置、あるいは排気ファンの機械的振動から回収することを想定して研究開発を実施している。

3.2.1 提案発電セルの概要

機械振動から無線センサユニットの駆動電力を得るためのエネルギーハーベスティング装置として磁歪材料と電磁誘導を利用した発電セルの検討を行った。

図 3-2-1 に開発のイメージを示す。磁歪発電は、磁歪材で作られた振動梁に誘導コイルを巻いて、逆磁歪効果を用いて梁のひずみから電気エネルギーを回収する手法である。一般に、機械や設備の振動は、騒音の発生を抑えるために制振設計がなされていて、振動レベルは非常に小さい。このような弱い振動から無線センサユニットを動作させるのに十分なエネルギーを回収するためには、発電体の発電効率を高める必要がある。

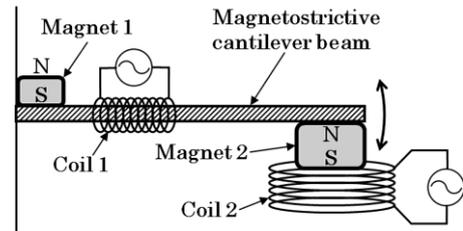


図 3-2-1 磁歪材料を用いた複合振動発電機構の概要¹⁴⁾

本提案では、磁歪発電の振動梁の先端に磁石と電磁誘導コイルを複合化させて、梁のひずみ(磁歪発電)と先端部の運動エネルギー(電磁誘導発電)の両方を活用した高効率発電の実現をめざしている。電磁誘導を利用した発電セルは、磁石とコイルというよく知られた組み合わせの発電体であるが、本研究では、磁場構造を工夫することで高い発電効率を実現している¹⁴⁾。磁歪発電は磁歪材料の性能で発電効率が決まり、様々な高効率な磁歪材料が提案されている。そこで、当センターでは、磁歪梁の先端に使う電磁誘導発電の高効率化に取り組んだ。以下では、それを報告する。

図 3-2-2 に本研究で提案する発電体の概略図を示す。図 3-2-3 は試作品の写真である。発電体は、リング状磁石の同じ磁極が対向するように配置して、これらを通る中心軸と背面フランジに高飽和磁束密度の軟磁性体を採用した構造になっている。発電コイルは、磁石を通る心棒を巻回す配置であり、このコイルと心棒は軸に沿って滑らかに摺動運動することが可能な構造になっ

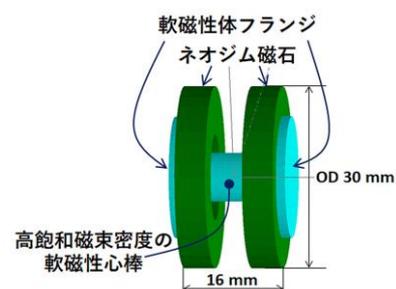


図 3-2-2 提案する電磁誘導式振動発電セル

ている。ここでは、磁石構造体とコイルを一体として「発電セル」と呼ぶことにする。

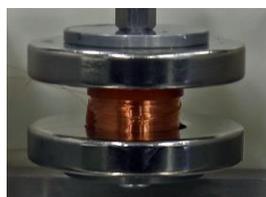


図 3-2-3 試作した発電セルの外観写真

3.2.2 開発の内容と成果

図 3-2-4 は、この発電セルの磁場構造に発生する磁束密度の強度分布である。これは、シミュレーション結果であり、実際に使用したネオジム磁石と軟磁性体の特性に近い磁気パラメータを選定して使っている。

図 3-2-5 は、図 3-2-4 と同じ発電セルの縦断面の磁束ベクトル分布のシミュレーション結果である。図4の矢印は磁束ベクトルの方向を表し、矢印の色が磁束の大きさを示す。磁束の大きさは、図 3-2-4 で示されるものと同じであることから、二つの図の色分布は一致している。

これらの図から、リング磁石の外側の面(フランジが接触している側の面)で発生した磁束は、心棒端部の軟磁性体フランジに吸収されて、高飽和磁束密度の心棒に誘導される。

この高飽和磁束密度の心棒内部では、磁束ベクトルは、おおよそ軸方向に平行になり、心棒の表面から漏出した磁束ベクトルは心棒表面におおよそ垂直方向に向いたベクトルとなる。この磁束は中心軸から放射状に広がって最終的にリング磁石の対極面で吸収される。この磁束ベクトルのレイアウトは、心棒磁性体の軸上で、軸に概ね平行な方向の磁束ベクトルを有しながら磁束強度が急峻に変化するものとなる。また、心棒から漏出した磁束線はコイルの巻き線に対して概ね直角方向に交差する。

図 3-2-6 に本発電セルの心棒の軸上に発生する磁束強度の分布図を示す。この図の磁束は発電コイルの内部を貫くものであるため、軸上を摺動するコイルにとっては、曲線の傾きに比例した磁束変化が生じることになる。コイルを貫く磁束 ϕ の時間変化は、 $V = d\phi/dt$ からコイルの起電力となるため、この発電セルにおいてコイルと磁石構造の摺動運動は、起電力を生じる。

以上が、提案する振動発電ユニットの発電原理となる。ここで、発電効率は、発電セルの心棒内部における軸

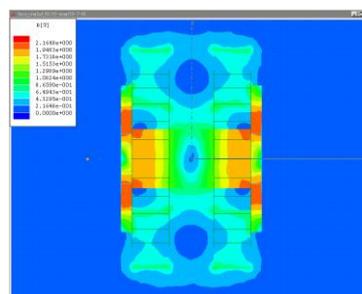


図 3-2-4 提案する振動発電セルの磁束強度分布

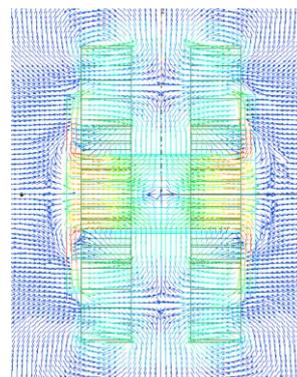


図 3-2-5 提案する振動発電セルの磁束ベクトル分布

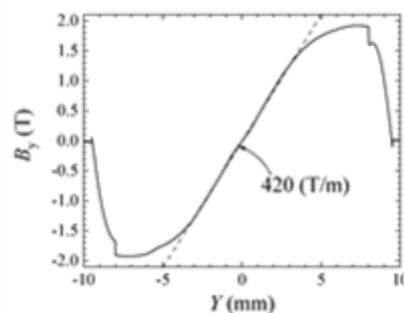


図 3-2-6 発電セルの心棒軸上の磁束強度分布¹⁴⁾

方向の磁束強度の傾斜、及び、振動の移動速度に比例することになる。振動の移動速度 v は、振動の周波数と振幅で規定され、振動の振幅を x_{MAX} 、振動の周波数を f とすると、

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f x_{MAX} \cdot \cos(2\pi f t)$$

となることから、振幅と振動周波数に比例する。

提案する構造では、図 3-2-6 のように中心軸上で 420 T/m の急峻な磁場勾配が形成されることから、中心軸を巻き回して軸方向に移動可能なコイルを配置することで磁石ユニットとコイルの相対運動から効率的に発電する機構が提案できる。提案構造で形成される磁場勾配は、

同サイズの円柱磁石の磁場勾配と比較して約 10 倍の勾配となるため、発電効率もこれに比例して 10 倍程度の高効率を実現している。すなわち、本提案構造は、同サイズの円柱磁石とパンケーキコイルとの組み合わせに比して 10 倍の発電効率を有することになる。

図 3-2-7 にこの発電体と板バネで構成した振動発電ユニットの試作品を示す。板バネの選定とばねの支点間隔距離の設定は、この発電ユニットが東日本の商用電源周波数で振動する装置への装着を目標ターゲットに設定にしたことから、発電セルがおおよそ 50Hz の振動周波数で共振振動するように設計されている。

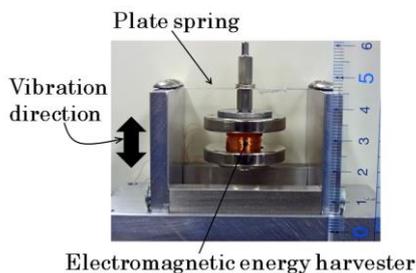


図 3-2-7 板バネを用いた振動発電ユニット外観

図3-2-8に図3-2-7の発電ユニットを加速度0.15G (1.47m/s²)の共振周波数で振動させた場合に生じる発電電力を示す。図表の横軸は接続する出力抵抗の抵抗値である。この発電体に接続する出力抵抗を最適化することで0.15G (1.47m/s²)という小さな振動加速度において1.2mWの出力電力が観測された。本研究の詳細については、参考文献14に示し公開している。

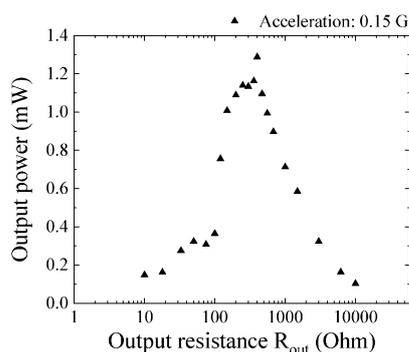


図 3-2-8 試作発電ユニットの発電電力の出力抵抗依存性¹⁴⁾

本研究の研究期間では、発電セルの発電効率の評価までに止まったが、従来の電磁誘導方式に比べて約 10 倍の効率を有することから、今後は用途開発を行って、その用途に応じたサイズと振動構造の提案を行っていきたく考えている。本発電セルは、磁歪発電と比較し

て、少ないコイル巻き数で発電できることから、出力インピーダンスを低く設定できて、電流が多く取れる蓄電効率の高い発電セルを提案できる。本発電セルは、電池を使わない無線センサシステムの構築に有効な振動発電の一手法として広く普及していきたいと考えている。

(本節の文責 中居 倫夫)

4 工場内電磁ノイズ(EMC)対策

4.1 工場ノイズの実際と取組みの概要

IoTセンサネットワーク技術の普及に伴い、工場の製造現場への無線センサの導入要望が拡大している。特に、製造工程の異常発生を予知したり異常をリアルタイムで検知したりする無線システムは中小企業の現場でも強く求められている。本研究では、工場内で発生するスイッチングノイズ等のパルス状ノイズがセンサネットワークの通信に及ぼす影響を明らかにし、その評価方法を提案するとともに対策指針を明らかにすることを目的にして、以下の検討を行った。

はじめに、①実際に稼働中の工場内部のノイズを測定するとともに、これと類似するノイズ波形の発生源となる加工装置を抽出し、ノイズが発生するタイミングや特徴を明らかにする。次に、②加工機のノイズと類似のノイズ波形を発生させて無線センサネットワークの通信に及ぼす影響を確認する¹⁵⁾。③パルス状ノイズの計測評価や無線センサの通信に及ぼす影響を定式化するために、任意波形発生器でノイズ信号を模擬して、その影響や評価方法を探索する。

これら3段階の検討を実施するに当たり、パルス状ノイズを計測し評価するのに適した測定機能を搭載した測定器を導入して、研究に活用した。結果として、工作機械から発生するパルス状スイッチノイズが920MHz帯センサネットワークの通信に影響を及ぼし得ることを明らかにし、このようなパルス状ノイズを測定評価する方法についての知見と経験を構築することができた。以下にその内容を報告する。

4.2 工場のスイッチングノイズ

企業の製造現場における工程管理や装置異常検知などの設備保全に無線通信を用いたセンサネットワークを活用する技術が広く普及してきている。小型無線ユニットとして、様々な機器が市販されはじめており、マイコンプログラミングの技術があれば、自前で無線センサノ

ードを構築して、工場独自で簡単にシステムが構築できる状況になっている。中小企業の製造現場においても、このような市販無線ユニットを活用して工場独自で無線監視システムを活用したいという要望や実際に活用し始める事例が増加している現状であり、これに伴い、工場内の無線通信の健全性についての懸念や、これを評価測定する方法についての質問の声が聞かれる状況にもなりつつある。

縁があり、中小企業である鉄鋼部品製造企業の工場内の電磁ノイズを実測する機会があった。図4-1に工場内での測定風景を示す。測定には、300MHz～2.5GHzの広帯域ログペリオディカルアンテナを使用し、波形観測にはスペクトラムアナライザとオシロスコープの両方の機能を統合したTektronix社のMDO4054Bを用いた。



図 4-1 工場内ノイズの測定風景¹⁵⁾

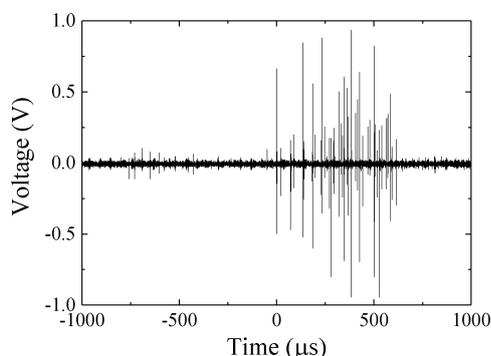


図 4-2 工場内ノイズの一例¹⁵⁾

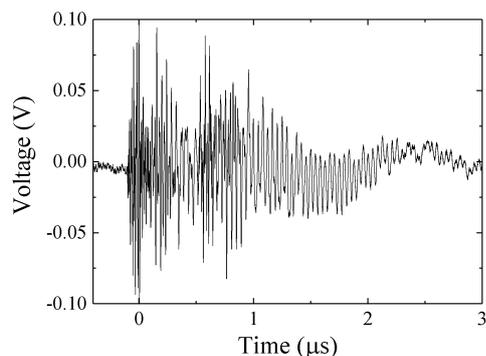


図 4-3 工場内ノイズの波形(1パルス拡大)¹⁵⁾

測定の結果を、図4-2に示す。図は、アンテナからの波形をオシロスコープモードで観測したタイムドメイン波形である。工場の大型装置の動作音の発生に合わせて電圧振幅の大きなパルス状ノイズが連続的に発生することが観測された。これらパルス状ノイズの一つを取り出し時間軸を拡大した結果を図4-3に示す。この図から、1本のパルスに見えていた信号波形は、拡大すると、高周波振動が急激に減衰するような波形になっていることがわかり、パルス波形の内部に何らかの高周波成分が内包されていることが見いだされた。

工場の中で観測された、数百ナノ秒の減衰振動波形を伴うパルス状ノイズの発生源を探るために宮城県産業技術総合センターで保有する機械加工装置について、ノイズ発生の確認を行った。その結果、大型の機械加工機(フライスやシャーリングマシン)では特記すべきノイズの発生は観測されなかった。一方で、ボタン式のスイッチを手動でON/OFFするような工作機械については起動時や停止時にパルス状ノイズが発生することが確認された。このパルス状ノイズはアンテナを使って観測されるような放射電磁界波形であり、その波形は、実際の工場で観測されたような、高周波の減衰波形を伴った持続時間が数百ナノ秒のパルス状波形であった。

このようなパルス状の放射ノイズ波形を発生する加工装置は複数確認されたが、本報告では代表的な2件について実測結果を示しながら掲載する。

一つ目は、ホイストクレーンである。最大荷重500kgのホイストクレーンと放射ノイズの測定風景を図4-4に示す。測定は20MHz～3GHzの放射電磁界を測定できるバイユニカルアンテナ(マイクロニクス社 MAN150)を利用して、減衰パルスに含まれるスペクトル波形の計測には、Tektronix社のMDO4054Bを用い、ノイズの時間波形観測にはKeysight社のオシロスコープDSOS404Aを用いた。これら測定器の代表的なスペックを表4-1に示す。



図 4-4 ホイストクレーンの測定風景

表 4-1 使用したオシロスコープの代表的仕様

	DSOS404A		MDO4054B	
	オシロスコープ	オシロスコープ	スペクトラムアナライザ	
アナログ帯域幅 (-3dB)	50Ω: 4 GHz	500 MHz	スパン	1 kHz ~ 3 GHz
垂直軸分解能	10 bit	8 bit	RBW	10 Hz ~ 200 MHz (typ.)
サンプリングレート	最大20 GS/s	2.5 GS/s	リファレンスレベル	-140 dBm ~ +30 dBm

測定系のブロック図を図4-5と図4-6に示す。パルスノイズのスペクトル測定には、MDO4054Bを用いて、パルス発生タイミングのトリガにピックアップコイルからの信号を増幅して用い、このトリガタイミングを基準に所定の時間間隔内におけるスペクトルを帯域3GHzの内蔵スペクトラムアナライザで観測した。図4-6は、3方向パワースプリッタを用いて、MDO4054Bでパルスノイズのスペクトルを観測すると同時に、同じパルスの時間波形をDSOS404Aで観測するための測定系である。いずれの測定系でもパルスノイズの信号は、ほぼアンテナを測定

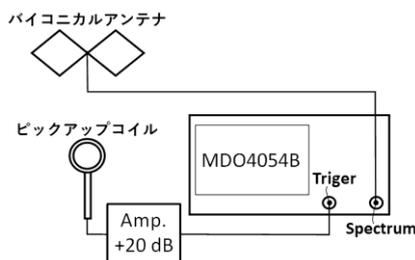


図 4-5 ノイズ測定系のブロック図(その 1)

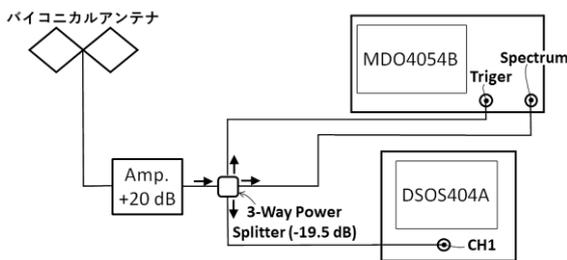


図 4-6 ノイズ測定系のブロック図(その 2)

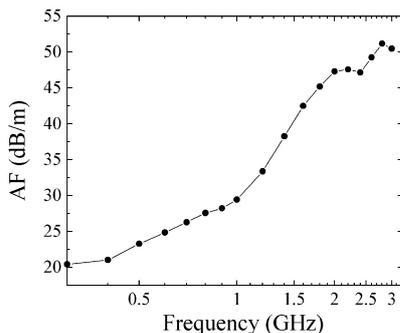


図 4-7 バイコニカルアンテナのアンテナファクタ

器に直結した場合と同等の信号レベルになっている。なお、使用したバイコニカルアンテナのアンテナファクタ(カタログ代表値)を、図4-7に示す。

図4-8は、ホイストクレーンの操作ボタン(昇降)を押したときに現れるノイズ波形の一例である。この例では、連続的に発生した持続時間200ns程のパルス状の減衰波形が300ns程度のインターバルで複数発生している様子が分かる。

ホイストクレーンでは、手動スイッチの押し方によってこのような連続パルスになる場合も、オシロスコープの画面上では単パルスしか確認できないような単発のパルス波形が発生することも、いずれの特性の波形も観測された。ただ、ボタンスイッチの手動操作では、この2種類のパルス波形を制御して発生させることはできなかったため、ここで紹介する波形やスペクトルは場当たりに観測されたものであることをお断わりした上で紹介したい。

図4-8の観測画面は、MDO4054Bの観測波形であり、オシロスコープ波形の任意の時間幅の部分のスペクトル波形を、内蔵のスペクトラムアナライザで観測できる機能を有している。図の中央下部にオレンジ色の太い横棒が表示されているが、この時間領域のスペクトルを抽出して周波数ドメインで表示する機能がある。本研究では、この機能を活用して1パルスに含まれる周波数スペクトルを測定した。



図 4-8 ホイストクレーンの放射スイッチノイズ

図4-9は、高周波オシロスコープで観測した1パルスの時間波形である。パルス発生初期に高い周波数成分が含まれていることがわかる。この波形と同じタイミングで観測したMDO4054Bのスペクトル波形を図4-10に示す。図の青線は、バックグラウンド(B.G.)である。B.G.と比較すると2GHz程度までノイズのスペクトルが伸びていることが分かる。以下の測定との比較のため、ノイズ源とアンテナの距離は、1mに換算してある。図4-10と、図4-13のB.G. レベルの違いは、この距離換算の影響である。

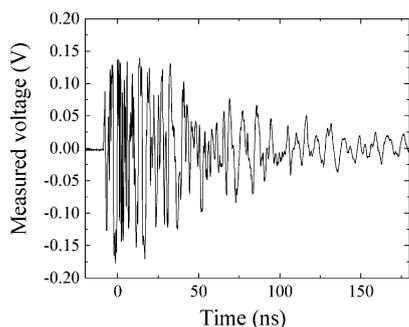


図 4-9 ホイストクレーンの放射ノイズ波形

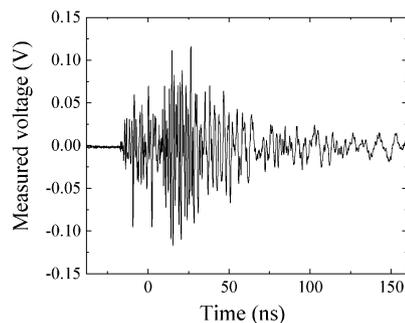


図 4-12 ノコ盤の放射ノイズ波形

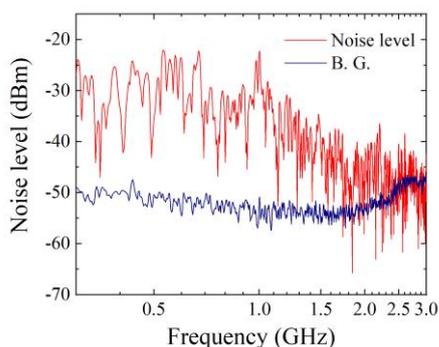


図 4-10 ホイストクレーンの放射ノイズスペクトル

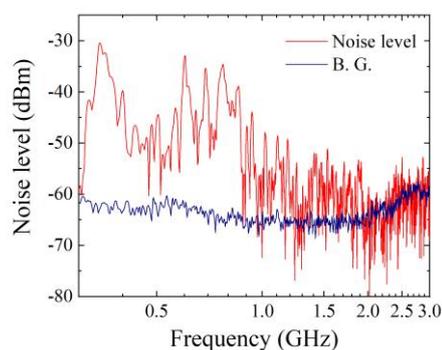


図 4-13 ノコ盤の放射ノイズスペクトル

二つ目は、金属を切断するノコ盤である(図4-11)。このノコ盤の起動ボタンを押した際のノイズ波形を図4-12、図4-13に示す。図4-12はオシロスコープの時間波形で、図4-13はMDO4054Bのスペクトル波形である。ノコ盤の場合は、ホイストクレーンに比べて、ノイズの周波数帯域が低周波に限られている。しかしながら、1GHz付近までノイズ信号のレベルが高くなっていることがわかる。

以上の2つの測定は、スイッチノイズが発生する加工装置の一部である。確認できたところでは、ラクソー、グラインダ、ハンドカッター、加工装置とは異なるものの、電灯スイッチ、磁粉探傷磁化器のスイッチでも同様のパルスノイズが放射されていることが確認できた。このパルスノイズの原因は、スイッチ接点での放電と推測できるが、詳細な確認までは今回の検討では行っていない。



図 4-11 ノコ盤のノイズ測定風景

4.3 放電ノイズの無線センサ通信への影響確認

高調波を内包する間歇的なパルス波形を模擬するために、スパークプラグの放電パルスを利用してこれが無線センサの通信に与える影響を評価する実験測定系を構築した。電波暗室の中にパルスノイズ発生源と920 MHz帯GFSK変調のセンサネットワーク用無線装置を設置して、パルスノイズを印加した際の無線装置間の通信の成立状況を測定した。この実験のイメージ図を図4-14に示す。

図4-15にパルスノイズ発生装置の概略図を示す。装置は、イグニッション電圧発生回路に周期的なトリガ信号を入力してパルス電圧を発生させ、このパルス電圧を昇圧して絶縁破壊電圧まで上昇させるためのイグニッションコイルを介してスパークプラグに接続している。

図4-16は、本装置で発生したスパークプラグの放電の様子である。実験では、一定間隔で発生する周期的パルスノイズを発生させて実験を行った。周期的パルスの発生周波数は、100Hz から 1,200Hz で任意に設定できる。

図4-17は、ノイズ発生源であるスパークプラグ近傍にピックアップコイルを置いてこの信号をトリガとして、イグニッション電圧と放電時のアノード電圧を測定した結果

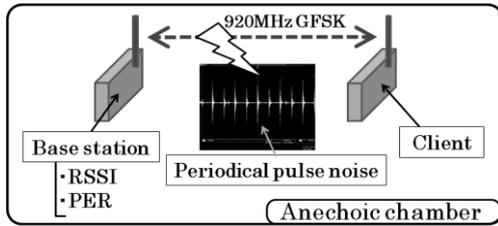


図 4-14 センサネットワーク通信への影響評価のイメージ図¹⁵⁾

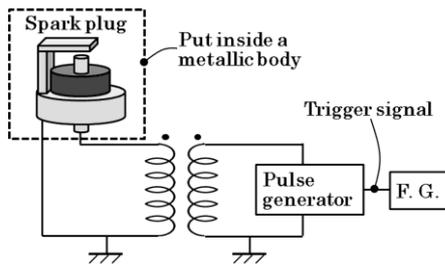


図 4-15 パルスノイズ発生装置の概略図¹⁵⁾



図 4-16 スパークプラグの放電の様子¹⁵⁾

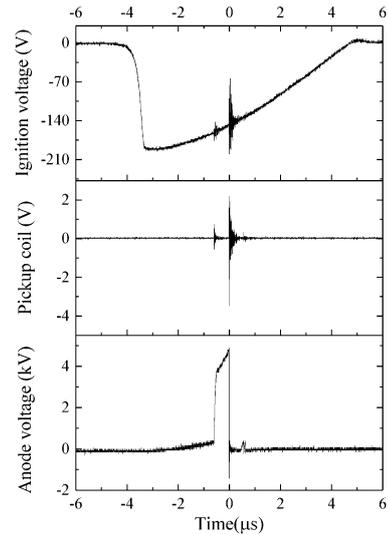


図 4-17 スパークプラグの放電時波形¹⁵⁾

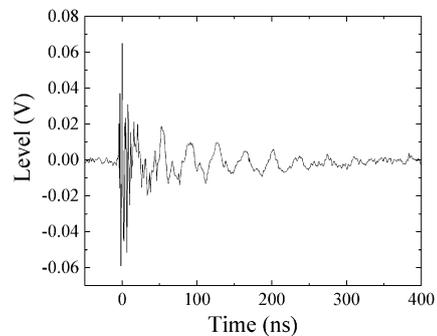


図 4-18 放電消弧時の放射ノイズ波形¹⁵⁾

である。本図から、ピックアップコイルに大きなパルス信号が観測されるのは、アノード電圧がステップダウンするタイミングであり、このノイズ発生源から発生するパルスノイズは、このタイミング、すなわち放電が消弧するタイミングで生じていることがこれから分かる。放電が生じるアノード電圧はおおよそ5kVであり、これはスパークプラグの電極間距離と大気圧における絶縁破壊電圧と一致する。パルスの発生周期を変えた場合の放電ノイズ波形の変化については、参考文献15で報告しており、詳細はそちらを参照して欲しい。この検討結果から、パルスの発生周波数100Hzから1kHzで放電のパルス波形はほぼ同じであることが確認されている。

この放電消弧時の放射ノイズをアンテナで観測した結果を図4-18に示す。本測定結果は、ピックアップコイルの信号をトリガにして3m離れた位置の広帯域ログペリオディカルアンテナに誘起された電圧波形であり、空間に放射されたパルス電磁界ノイズの波形と推測できる。

測定系は、電波暗室内部の測定系を使用した。オシロスコープは、Infinium 54845Aを用いた。測定帯域が

1.5GHzであることから、その測定サンプリング上限に近い周波数帯域での減衰振動が観測されている。

なお、本測定では、アンテナと測定器の間に26dBのアッテネータを挿入しているため、図のピーク電圧の+0.066Vは、アッテネータの減衰を除去した場合、1.32Vとなり、これをアンテナ係数で換算すると、おおよそ10V/mの電界強度となる。すなわち、10ns程度の短時間ではあるが、ノイズ源から3mの距離で、数百MHzの周波数帯域に10V/m程度のノイズ電界が発生していることになる。

このレベルは、同じアンテナを用いてアッテネータ無しで測定した工場内電磁ノイズ(図4-2)の最大パルス振幅(0.9V)と同程度となっていることから、今回の実験系を用いて、実際の工場内部で観測されたパルスノイズ強度と周波数帯域、そしてパルスの持続時間が大差ない条件での実験検討が、本報告の実験系で実施できることがわかった。スパークプラグの放電から放射される電磁界の波形が、工作機械のスイッチノイズの波形と良く似ていることから、工作機械のスイッチノイズが接点ス

パークに起因しているという推測は、大きく外れていないものと思われる。

上記のスパークプラグの放電実験を基にして行った電波暗室の実験系の模式図と実際の実験風景を図4-19と図4-20に示す。実験は宮城県産業技術総合センターの3m法電波暗室で行った。使用したアンテナは広帯域ログペリオディカルアンテナ (SCHWARZBECK VUSLP9111B) で、放射された放電ノイズはMDO4054Bでパルスの持続時間にウィンドウをかけて含まれる周波数スペクトルを観測した。無線センサネットワークへの通信影響の評価には、市販の920MHz帯GFSK通信機を用いた。

本実験の詳細についても、参考文献15で報告しているため、ここでは得られた結果のポイントだけを示す。図4-21は、本報告のパルス電磁界の1パルスにウィンドウをかけてスペクトル測定をした際の測定画面である。画面の上半分がタイムドメインの波形表示で、1パルスの波形を表示している。この波形の下部に太い横バーが表示されているが、これが周波数スペクトルを測定する時間ウィンドウである。本測定では、パルスを中心にして時間スパン450nsのウィンドウを設定した。

図4-21の下半分の波形は、周波数ドメインのスペクトル波形である。ここでは、100MHzから1,200MHzまでの帯域のスペクトル波形(縦軸dB[V])を表示している。スペクトルの表示は複数の線が見えるが、これはMax hold,

Average, Normalの3本の線である。本測定では、パルス電圧にトリガを設定して10秒間の測定を行った。なお、測定のRBWは時間ウィンドウと連動して自動設定され、この測定では5MHzであった。

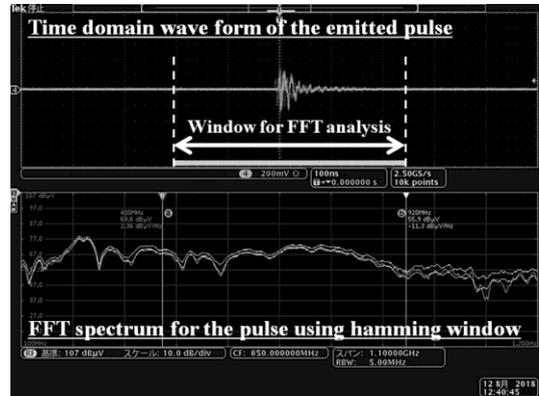


図 4-21 パルス電磁界の MDO による測定例¹⁵⁾

図 4-22 に測定したスペクトル波形を示す。図には、バックグラウンド (BG), 及びパルス周波数 100Hz, 500Hz, 1,000Hz の3条件における周波数スペクトル波形を示している。図の波形は、Max hold の値である。バックグラウンドの測定時に、920MHz 帯の無線機を動作させていたため、ここにピークが観測されている。本測定から、パルスノイズが有するスペクトル波形とレベルは、パルス周波数による変化がほとんど無いことが分かった。この測定から、通信周波数である 923MHz におけるノイズレベルは、バックグラウンドレベルから約 27dB 上であることが分かる。なお、本測定においては、縦軸の値は設定された RBW の値で変わるため、信号レベルの絶対値ではなく信号間の相対値として使用することにする。

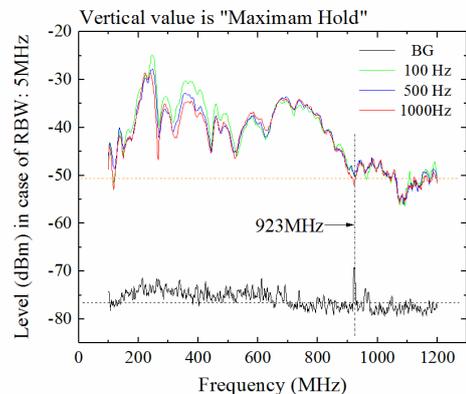


図 4-22 パルス電磁界のスペクトル測定例¹⁵⁾

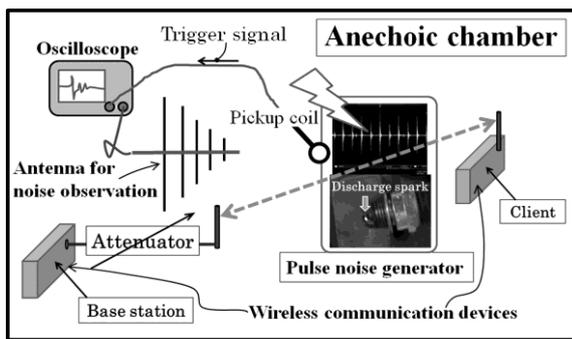


図 4-19 電波暗室の実験系の模式図¹⁵⁾

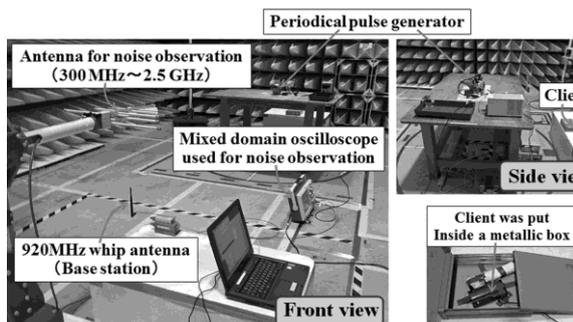


図 4-20 電波暗室の実験系の写真¹⁵⁾

表4-2は、920MHz帯GFSK通信機の設定パラメータである。ここで、送信出力は設定可能な最小の値とした。

センサネットワークの無線通信に対するパルスノイズの影響は、通信機に付属する制御・計測機能を使い、通信の受信信号強度 (Received Signal Strength Intensity: RSSI), パケットエラー率(Packet Error Ratio: PER)で読み取った。

表 4-2 920MHz 帯 GFSK 通信機の設定¹⁵⁾

	親機	子機
送信出力	0.16mW	0.16mW
ビットレート	19,200 bps	19,200 bps
ビット長	8 bit	8 bit
パリティ	odd	odd
プロトコル種別	ASCII	
パケットフィルタリング	有り	有り
タイムアウト時間	4 s	1 s

図4-23(a)は、パルス周波数900Hzの場合の通信の受信信号強度RSSIとパケットエラー率PERの値を、無線親機のアンテナに付けた可変アッテネータによる減衰率を横軸として表示した図である。受信信号強度RSSIとパケットエラー率PERは通信機から付属のソフトウェアを使った読み出すものであり、測定原理や単位が明示されていないため、あくまで指標値として利用することとする。本測定より、可変アッテネータの減衰率を増加させることで受信信号強度RSSI(図4-23の破線)が単調に減少しており、アンテナと受信機の上に設置した可変アッテネータで通信機間のRSSIを調整可能であることが分かった。図の実線は、通信のパケットエラー率PERである。この値も装置に付属のソフトウェアを使って読み出す値である。本測定結果から、パルス周波数900Hzにおいて、アッテネータの減衰率17dB以下では、PERがほぼ零である。減衰率47dB以上では、PERが100%となり通信が成立しない。減衰率17dBから45dBの間では、減衰率の増加に伴い、PERは直線的に単調増加する結果が得られた。

図4-23(b)は、パルス周波数100Hzの場合の測定結果である。この場合、パケットエラー率は、減衰率42dBから47 dBの範囲で急激に増加しており、図4-23(a)と異なり、受信限界でPERが急増するノイズ印加が無い状態とほとんど変わらない傾向になることがわかった。

図4-24は、図4-22に示した放電パルスの放射ノイズを測定する際のトリガレベルを変えて、観測されるノイズスペクトルのMAX holdとAverageの測定レベルを取得したものである。ノイズスペクトルは広い周波数範囲で発生しているが、本図は周波数923MHzの周波数における値を表示している。ここで、測定のトリガレベルとは、MDO4054Bの機能である任意時間幅におけるスペクト

ルを測定する際の時間基準点を定めるためのトリガである。

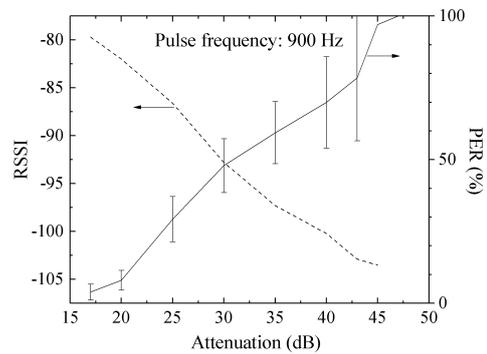


図 4-23(a) パルス電磁界の 920MHz 通信への影響(パルス周波数 900Hz)¹⁵⁾

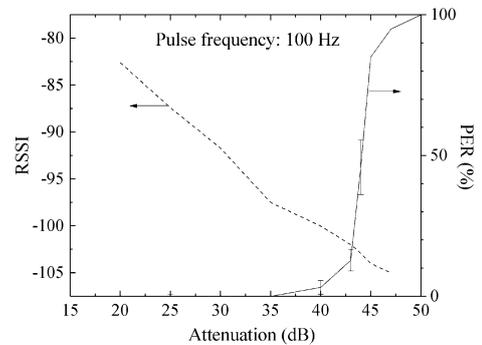


図 4-23(b) パルス電磁界の 920MHz 通信への影響(パルス周波数 100Hz)¹⁵⁾

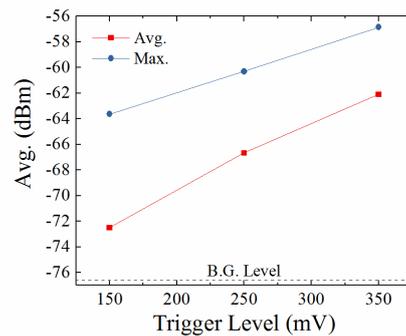


図 4-24 トリガレベルとノイズスペクトルの MAX hold と Average の測定レベルの関係

本研究の測定では、パルスノイズの時間波形の電圧レベルをトリガレベルとして利用しており、この電圧トリガのレベルを超えたパルス信号のみを選択して、その周波数スペクトルを測定していることになる。図4-24ではその際に得られたノイズスペクトルのMAX holdとAverageのレベルを示している。この図のMAX holdとAverageの

差は、所定のアベレーシング時間内にトリガされたパルスノイズの強度バラツキを示すものと解釈できる。最大の信号レベルを持ったパルス波形はMAX holdの値として捉えられているが、それ以下の低いレベルのパルス波形も多数含まれていることが、MAX holdとAverageの差として現れている。このことは、放電スパークで発生するパルスノイズの波形が発生の都度変わることをしており、図4-23 (b)のPER値の傾斜波形はこのパルスノイズのレベルばらつきの影響と考察できる。

次節では、この確認も含めて、高周波任意波形ジェネレータを使って単一周波数の減衰波パルスが発生させて検討を行った。

4.4 模擬ノイズを用いた影響評価とリアルタイムスペクトラムアナライザの活用

ここまでの報告をまとめると、はじめに、製造工場内部にアンテナを設置して放射電磁界を測定すると、パルス状ノイズが多数発生している事例が確認された。次に、このパルス状ノイズと類似したノイズを発生させる機器を探索したところ、手動ボタンでスイッチをON/OFFする小型装置や加工機、例えば、ホイストクレーン、ノコ盤、ラクトソー、ハンディカッターなどでこれが発生していることを確認した。そして、このパルス状ノイズを無線センサネットワークの通信信号に重畳させたところ、パルスノイズの発生頻度に応じて通信の packets エラーが増加することを確認できて、持続時間が短いパルス状の放射ノイズであっても通信に影響を及ぼすことを明らかにした。

以上の結果に基づき、本節では、工場内の放射パルスノイズの評価方法について検討した。

最初は、パルス状ノイズを評価する計測方法について検討した。この検討ではパルスノイズ源としてノイズ強度や周波数スペクトルが安定しない放電スパークを使わずに、高周波任意波形発生装置を用いて素性のわかったノイズ波形を発生させてこれを評価に用いた。

図4-25は、高周波任意波形発生装置 (Keysight M8190A) の写真である。オシロスコープDSOS404Sの下部にある黒色の装置がそれである。この装置は、12GS/sのサンプリングレート、12bitの精度で任意波形を発生させることができ、おおよそ2.4GHzの波形であれば生成可能な性能を有する。

これを用いて加工機から発生するパルス状ノイズを模擬した波形を発生させた例を図4-26に示す。この信号波形は、周波数920MHzの減衰波形が約150nsで収束する信号波形になっており、放電スパークで観測された

ノイズ波形を模擬したものである。この波形は、単一周波数の減衰波形であるため、実際の広帯域な放電信号よりシンプルで扱いやすい。周期的に発生させた場合でも、各周期のノイズ強度が安定したものが得られる(図4-27)。図のパルス間隔は発生周期に対応する。



図 4-25 高周波任意波形発生装置 (Keysight M8190A)

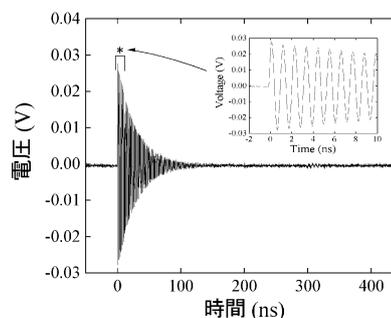


図 4-26 減衰パルスノイズの模擬波形

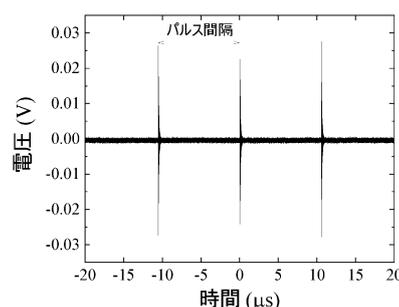


図 4-27 周期的パルスノイズの模擬波形

このパルス状ノイズ信号を、EMIレシーバをはじめとした各種放射ノイズ測定器で測定した結果を、図4-28に示す。測定は図4-27の周期ノイズをSMAケーブルで測定装置に入力して、表示された値をプロットした。図の横軸は、パルス間隔である。リアルタイムスペクトラムアナライザ (RSA) とMDO4054Bはパルス状ノイズを観測するのに適した装置であるため、パルス間隔に影響されず

に一定のレベルで計測できている。RSAとMDOのレベルの違いは、MDOのウィンドウ時間幅(RBW)の設定に起因するエネルギーの取扱いの差に原因がある。EMC測定で使われるEMIレシーバと掃引型のスペクトラムアナライザでは、パルス間隔が長くなると信号レベルを過小評価する傾向があることがわかった。本測定のEMIレシーバの測定では、EMC測定で推奨される条件、すなわち、RBW120kHzでQP検波を使って測定してある。今回、実験評価して通信影響が確認された1kHz以下のパルス周期では、EMIレシーバでは約30dBの過小評価になる可能性があることがわかった。

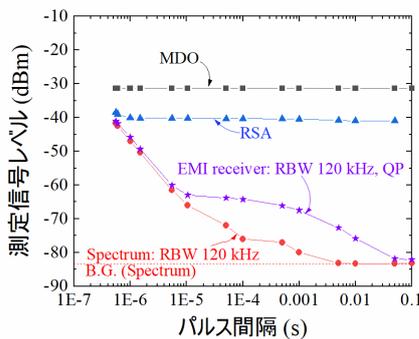


図 4-28 パルス状ノイズを各種放射ノイズ測定器で比較した実験結果

次に、リアルタイムスペクトラムアナライザ(RSA)を用いて通信信号とパルスノイズの観測を行った結果を示す。

図4-29は、測定で使ったリアルタイムスペクトラムアナライザ(Tektronix RSA5126B)である。図4-30は電波暗室内の実験風景である。高周波任意波形発生装置でパルスノイズを発生させて、これをアンテナで放射させ、この環境にある920MHz通信機の通信信号を観測しながらパケットエラーを測定した。

図4-31にRSAで920MHz帯GFSK変調のセンサネットワーク用無線装置の信号を観測した波形を示す。中心周波数922.5MHzで約±50kHzスパンで周波数シフトした信号が送信されているのがわかる。画面全体に水平に広がっている信号は、パルスノイズの信号である。この図4-31は横軸が周波数の波形であるが、同じ無線機の信号を時間軸で観測したものを図4-32に示す。この図で見られる矩形状のステップ波が通信信号であり、通信の持続時間は5.2ms、これが198.8msの時間毎に発生していることが観測できて、この無線装置の通信信号が一目でわかる。

ここに、パルスノイズとして図4-33のような、400nsの持続時間で周波数922.5MHzの矩形波が、所定のパルス



図 4-29 リアルタイムスペクトラムアナライザ (Tektronix RSA5126B)

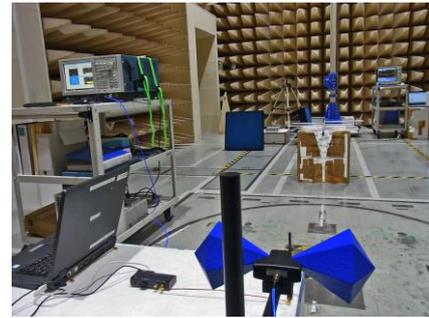


図 4-30 電波暗室内の実験風景

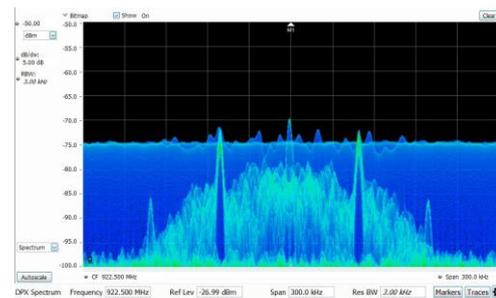


図 4-31 RSAで観測した920MHz帯GFSK変調の通信波形(スペクトル)

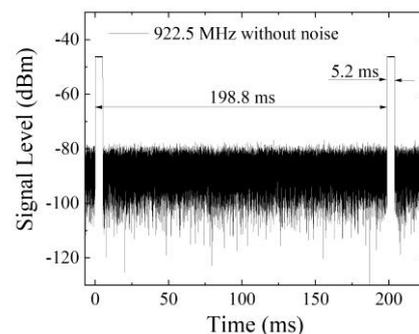


図 4-32 RSAで観測した920MHz帯GFSK変調の通信波形(時間軸)

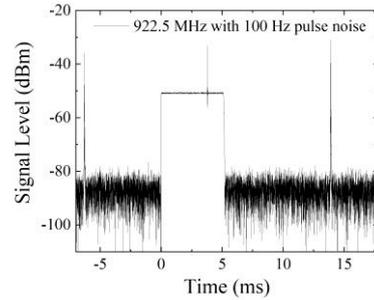
間隔で入射した場合の通信状態を観測した。

図4-34(a)から図4-34(b)がそれである。これらは横軸が時間軸の波形であり、図4-32を拡大したものである。図の中央部に見える矩形状波形が無線機の通信信号

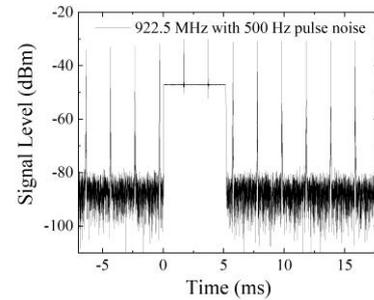
(持続時間5.2ms)である。これらの図にある針状の信号がパルスノイズ波形である。図4-34(a)では、パルス周波数が100Hzで図中に3本のパルスノイズが見られ、このうち1本が通信と重なっている。図4-34(b)では、パルス周波数が500Hzで図中にある2本のパルスノイズが通信と重なっている。図4-34(c)では、パルス周波数が1kHzで図中にある6本のパルスノイズが通信と重なっている。このようにRSAで観測することで、無線機のデジタル通信とパルスノイズの干渉状態が目で見えるようになる。

高周波任意波形発生器で図4-33のノイズを発生させて、無線機の通信エラーを確認した結果を図4-35に示す。本図では、縦軸にパケット生存率を用いているが、これは、パケットエラー率(PER)を1から引いた値に対応しており、1であればパケットエラー無しで全て生存、ゼロであればパケットは一つも通らない状況を示す。本実験のセンサネットワーク通信機間の通信信号のレベルは、-70dBmに設定した。図4-35の測定結果から、通信信号よりノイズレベルが小さい時は、パケット生存率は、ほぼ1になっていることがわかる。

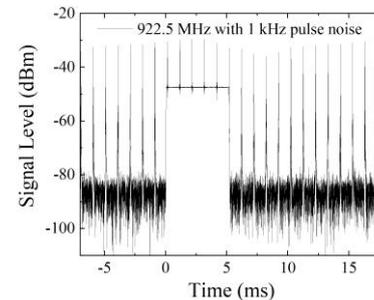
一方、通信信号よりもパルスノイズのレベルが高くなるとパケット生存率に影響が出はじめる。パケット生存率のパルス周波数依存性としては、周波数を高くするとパケット生存率が下がる。この傾向は、ノイズレベルに関係なくほぼ重なる曲線になる。この理由を考察すると、図4-34に示されるように、パルス周波数が上がると通信信号と交差するパルスが増え、これに応じてパケットが破壊され生存率が下がるというメカニズムになるのだと考察される。この実験結果は、スパークプラグの放電を用いた実験に比べて妥当性があり、スパークプラグの場合にみられた発生パルスのレベルとスペクトルがバラつく影響が本実験では無くなっているものと思われる。



(a) パルス周波数 100Hz



(b) パルス周波数 500Hz



(c) パルス周波数 1000Hz

図 4-34 パルスノイズが入射した場合の通信波形 (時間軸表示)

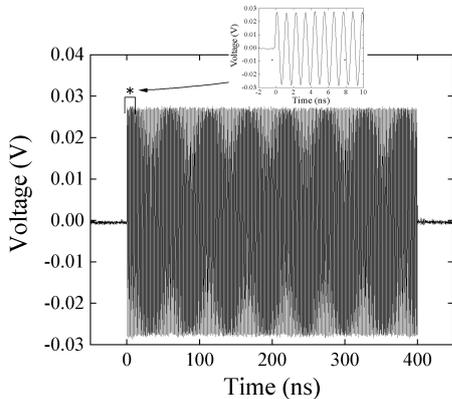


図 4-33 実験に使用したパルスノイズ波形

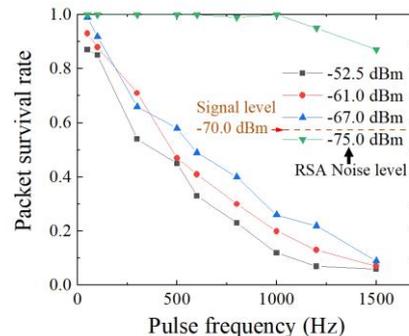


図 4-35 矩形パルスノイズの頻度とレベルに対するパケット生存率

本節の報告の最後に、RSAによる数百ナノ秒レベルの減衰波形の減衰率観測の可能性について示す。

図4-36はRSAの時間軸を拡大して観測した結果である。図の右上部にある図は、500ns程度で減衰する単一周波数の減衰ノイズの観測波形である。この程度の時間分解能になると、装置のトリガタイミングの揺らぎで、波形が画面に入らないことが時々発生したが、うまく画面に収まった場合には、この例のように数百ナノ秒の減衰パルスの減衰時間を推定出来る可能性が示された。

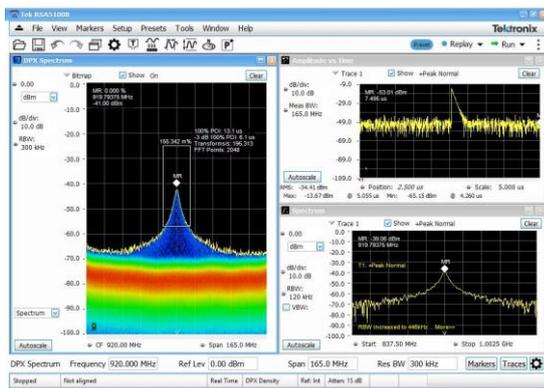


図 4-36 RSA による減衰波形の観測の可能性

(本節の文責 中居 倫夫)

5 結言

地域企業の IoT 化を推進する際に有効な、モノづくり企業の製造工程に適用する IoT 技術の要素技術として、以下の 3 課題に取り組んだ。

- [1] 工程における加工直後の仕掛品の全数検査を可能にするセンシング技術(「モノづくり工程の見える化」)
- [2] 工場内で可動しているモータ等動力装置の設備保全の無線センサ化(「設備保全の無線センサ化」)
- [3] IoT無線システムを正常に動作させるための工場内の電磁ノイズ(EMC)対策(「工場内電磁ノイズ(EMC)対策」)

結果として、関連する研究開発では、従来は困難であった技術の研究開発を行い、これと同時に、無線センサネットワークを中心としたIoT技術の地域企業への普及、そして新規導入した設備を用いた技術支援を可能にすることができた。

謝辞

「AI併用型ハイパースペクトルカメラ」は、平成30年度

地域新成長産業創出促進事業費補助金(地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業)にて導入したものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) T. Nakai, “Sensitivity of Thin Film Magnetoimpedance Sensor in 0.3 T Surface Normal Magnetic Field”, IEEJ Trans. ELEC-TRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 15, 1230-1235 (2020).
- 2) T. Nakai, “Magneto-Impedance Sensor Driven by 400 MHz Logarithmic Amplifier”, Micromachines, 10, 355 (2019).
- 3) 特許第6842164号(宮城県)
- 4) 中居倫夫, “薄膜磁気センサと強磁場を用いたインライン製品検査に関する研究”, 日本機械学会第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 01pm1-PN-155 (2018).
- 5) 中居倫夫, “薄膜磁気センサと強磁場を用いたインライン製品検査の多チャンネル化”, センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム講演論文集, 27P3-SSP-14 (2020).
- 6) 特開2020-165868(宮城県, 引地精工(株))
- 7) 中居倫夫, “薄膜磁気センサと強磁場を用いたインライン製品検査の磁性破片検出特性”, 令和3年電気学会全国大会講演論文集, 2-105 (2021).
- 8) 小野仁 他: 県内シーズを活用したエネルギーハーベスティングおよびセンシングシステムの研究開発, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 15, 2017, p.17-22
- 9) 中居倫夫 他: IoTを用いたモノづくり工程管理高度化のための要素技術開発【短報】, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 17, 2019, p.55-p.56
- 10) 中居倫夫 他: IoTを用いたモノづくり工程管理高度化のための要素技術開発【短報】, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 16, 2018, p.57
- 11) 林正博 他: 無線温度測定システムを用いた恒温恒湿槽の温度性能の評価【ノート】, 宮城県産業技術総合センター研究報告, 18, 2021, p.91-p.96
- 12) 渡邊洋一 他: 耐熱合金の精密加工技術開発【短報】, 宮城県産業技術総合センター研究報告, No.17, 2020, p.59-63
- 13) 特開2019-110629「蓄電回路」
- 14) T. Nakai, “Proposal of electrical energy harvester

using ring-shape magnets and FeCo magnetic core”,
Proceedings of The 15th International Conference
on Motion and Vibration (MOVIC), (2020).

- 15) 中居 倫夫, “周期的パルスノイズの920MHz帯
GFSKセンサネットワーク通信への影響”, 電気学
会電磁環境研究会資料, EMC-18-089, (2018).