

無線による自動温度データ収録システムの構築

○足立 匠、久島 萌人、山崎 高幸、藤森 隆彰

教育・研究技術支援室 計測・制御技術系

概要

小電力無線通信規格の一つである IEEE802.15.4 は、複数の無線機器間で双方向通信網の構築や中継機能を備えており、それらを容易に実現することが可能である。平成 25 年度名古屋大学技術職員研修(計測・制御コース)では、この IEEE802.15.4 に準拠した東京コスモス電機株式会社製の無線通信モジュール(TWE-001)を利用して、チップメーカーやモジュールメーカーが独自に開発した通信要求の仕組みや取り決めについて習得した。研修での経験(Jennic 社の API を利用したスター型のネットワークの構築)をもとにして、遠隔地の温度データを自動的に収集するシステムを構築したので、その具体的な使用例を報告する。

1 IEEE の概要

1.1 IEEE

IEEE^[1]は、アイトリプルイーと呼ばれ、正式名称を米国電気電子学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers)とし、1963 年に本部はニューヨークに創立された。この学会は、AIEE(American Institute of Electrical Engineers—米国電気学会)と IRE(Institute of Radio Engineers—無線学会)が合併して発足した。ここでは、電気、電子工学、コンピューターなどの分野における技術の標準規格を定めており、その多くは ISO (国際標準化機構)により国際標準として採用されている。またこの学会により標準化された規格の名称は“IEEE”で始まる。

1.2 IEEE802.15.4

無線通信規格の中で、LAN 関係の規格は“IEEE802 委員会”によって決められており、IEEE802.11b などを利用した無線 LAN や、近距離無線通信の仕様標準化のため 1999 年 3 月に“IEEE802.11”ワーキング・グループから独立して“IEEE802 委員会”に設置された IEEE802.15 が採択した、IEEE802.15.1 を利用した Bluetooth や IEEE802.15.3a を利用した UWB(Ultra Wide Band)などがある。それらに対し、IEEE802.15.4 は、WPAN(Wireless Personal Area Network)とも呼ばれる短距離無線ネットワーク規格の総称である。三菱電機など 5 社が策定した家電向けの無線通信規格のひとつの ZigBee などにおいて利用されており、低速な反面、低コスト・低消費電力で、高い信頼性とセキュリティを持つことを特徴とする。IEEE802.15.4 は 2.4GHz 帯の変調方式に Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK)、拡散方式にスペクトラム拡散方式 (DSSS)^[2]を採用しており、妨害ノイズに強く安定したデジタル双方向通信を行うことができる。この IEEE 802.15.4 は、伝送速度が 250 Kbps と無線 LAN (最大 54 ~600 Mbps) や Bluetooth (最大 24 Mbps) や UWB (最大 40 Mbps) よりも遅いが、一つのネットワークに多くのデバイスが参加可能である。なおかつ煩雑な設定なしで機器の追加や削除が行えるアドホックネットワークの対応が可能である。

また、IEEE 802.15.4 の割り当て周波数は、全世界での利用が可能な 2.4 GHz 帯(16 ch)と、米国やオーストラリアで使用可能な 915 MHz 帯(10 ch)と、欧州で利用可能な 868 MHz 帯と、中国で使用可能な 780 MHz 帯

などや、日本で使用可能予定な 920 MHz 帯がある。カッコ内は、IEEE 802.15.4/ZigBee の割り当てチャンネル数を記している。1 GHz 帯以下は、サブギガ帯と呼ばれ、通信速度が遅く、高度なネットワークを構築する必要がない場合に適している。しかしアンテナサイズの大きさや、国際的に利用が可能なことから、2.4 GHz 帯が主流になっている。

2.4 GHz 帯の電波は、ISM(産業科学医療用—Industrial Scientific Medical)バンドと呼ばれ、世界中で広く利用されている。この 2.4 GHz 帯で一番広く使われているものが電子レンジである。他にも WiFi や Bluetooth などのデータ通信や病院内で医療用に広く使われている。この 2.4 GHz 帯の特徴は、AM・FM 放送で使用されている周波数帯域と比較して非常に周波数が高いため、光に似た性質を持っている。直進性が強く、見通しの良い場所では長距離通信が可能であるが、物陰に入ってしまうと急激に電波強度が減衰してしまう。また、長距離通信では空気中の水分により電波強度が減衰する性質も持つ。これらの特性から、室内などの特定のエリア内でのみ通信可能なネットワークとして世界中で使用されている。また設計思想として消費電力を小さくしていることが挙げられ、電池交換なしで年単位の駆動や、ボタン電池での駆動、光、熱、振動等から電力を得る環境発電素子（エナジーハーベスター）での駆動が可能である。これにより、従来設置が困難であった場所で無線の使用が可能になる。

また、IEEE802.15.4 は、ZigBee アライアンスをはじめ多数の標準化団体（RF4CE、IETF 等）によりワイヤレス通信の物理層として採用されており、IEEE802.15.4 上で種々の標準通信プロトコルが実装されている。このように通信プロトコルを自由に選択できることも IEEE802.15.4 の特徴の一つである。

2 無線通信モジュール (TWE-001)

今回研修で利用した製品は、IEEE802.15.4 に準拠した東京コスモス電機株式会社製の無線通信モジュール (TWE-001) である。ネットワーク上での通信に関する規約を定めた各種プロトコルの中で、一番下位の物理層 (PHY) とメディア・アクセス層 (MAC) は標準化された IEEE802.15.4 を採用している。その上の層であるネットワーク層 (NWK) やアプリケーションフレームワーク^[3] の仕様は、IEEE802.15.4 を基にして、ZigBee Alliance が標準化して、まとめて ZigBee と定義している。

この ZigBee Alliance は、テクノロジーの普及/推進に取り組む団体で、相互運用テスト、証明テスト、規格の作成を行っている。この団体の認証試験に通った機器には、ZigBee ロゴが付与され、他の ZigBee 製品との相互接続・互換性が保証される。ユーザーは、ZigBee アーキテクチャーモデル（下位から物理層、MAC 層、ネットワーク層、アプリケーションフレームワーク、アプリケーション層）の内一番上位層のアプリケーション層のみを扱えばよい。

特徴として、瞬速起動（低レイテンシ）、超低消費電力、長距離通信の全てを高次元で満たすことを製品コンセプトとしており、この中でも特に超低消費電力を追求して開発をしたモジュールである。ボタン電池（CR2032, 容量 220mAh）を使用した場合の電池寿命は、10 秒間隔で送信した場合でも 2 年以上動作する。この時の消費電流（送信時:14.6mA, 受信時:17.2mA, ディープスリープ時:1.3μA）である。

高性能 PCB パターンアンテナを無線モジュールに内蔵しており、その通信距離は見通しで最長 400m に達し、無線モジュール上のコネクタに外部アンテナ（利得 2dBi、無指向性）を接続した場合、見通し伝送距離は約 1km に及ぶ。また日本国内で使用する際に必要な電波法認証である ARIB STD-T66 工場設計認証（技適）を取得済みなため、そのまま製品に組み込み使用することができる。

その他、小型パッケージ (Regular[mm]: 40×20×3.5, Strong[mm]: 45.5×20×3.5) の中に、低消費電力高性能 32 ビット RISC プロセッサ、12 ビット AD コンバータ（4 チャンネル）、12 ビット DA コンバータ（2 チャンネル）、コンパレータ、パルスカウンタ、汎用デジタル入出力ポートといった豊富な I/O を内蔵しており、各

種センサー、ディスプレイ、LED、スイッチ等を直接コントロール可能である。

また、ソフトウェア開発環境は無償で提供され、開発環境には、gcc ツールチェーン、Eclipse 統合開発環境、ToCoNet プロトコルスタックライブラリ、各種サンプルプログラムが含まれている。さらに ZigBee PRO 等の標準プロトコルスタックを無償で無線モジュール TWE-001 にダウンロードして利用可能である。

3 研修内容

平成 25 年 10 月 2 ～ 4 日にかけて実施された名古屋大学技術職員研修（計測・制御コース）では、講義が半日、実習が 2 日間かけて行われた。

講義は電波法の概要・小電力無線設備の例・デジタル変調の概説 を行った「小電力無線局の概要と電波法」、無線技術を使った研究例として地球水循環研究センターで行われている降水観測についての「マイクロ波降水リモートセンシング」、IEEE 802.15.4 を用いた通信に必要な知識として「無線通信規格 ZigBee の基礎」を座学で学んだ。実習では東京コスモス電機の無線通信モジュール TWE-001 Regular (以降 TWE-001) を利用したテスト回路を作成し、実習①では無線データ転送 を実習②ではツリー型ネットワーク を構築した。

初めにあらかじめ用意されたプリント基板にパソコンとの通信に必要なシリアル通信モジュール (FT232RL) と

TWE-001 を実装し、各種電子部品を取り付けたテスト回路を完成させた (図 1 作成したテスト回路)。ファームウェアは標準化されている通信規格として IEEE802.15.4 Stack API に、プログラミング簡易化がされた規格としてモジュールメーカーの独自規格である ToCoNet に対応したものを利用した。

ToCoNet は東京コスモス電機提供の API (Application Programming Interface)であり、通信用のライブラリ関数を使えば ZigBee の内部構造を知らなくても無線通信を確立することができる便利なソフトウェア環境である。今回このソフトウェア環境を自分のノートパソコンにインストールを行い。テスト回路を作成し、API で用意されている通信方法を学び、目的にあった通信を行う設定を行い、コンパイルし、データの送受信を行った。

・実習① IEEE802.15.4 Stack API を利用した無線データ転送

ZigBee の下位層である IEEE802.15.4 Stack API を利用したスター型ネットワークの端末デバイスを作成し、IEEE802.15.4 の基礎とチップ性能の効率的な利用 (通信速度) について学ぶ実習を行った。A/D 変換の結果を親機 (Coordinator) に送信する Jennic 製 無線制御プログラムを作成し動作を確認した。

具体的には、プログラムのベースとなる Jennic application template (JN-AN-1046) (以下ベースプログラム) の構造と親機と子機 (End Device) のネットワーク構築手順について理解を深め、ネットワーク構築手順のコンパイルと TWE-001 への書き込みを行った。その後、TWE-001 の動作状況を外部に出力するため、UART*による送信機能を追加した。これにより TEW-001 とパソコンのシリアル通信が可能となり、ステータスなどをパソコン画面で確認することが可能となった。次にタイマー機能と A/D 変換機能をプログラムに追加した。タイマー機能では割り込み処理を用いており、一定時間ごとに割り込みを行うことが可能となり、その処理として 4 つのアナログ入力端子とチップ内蔵温度、電源電圧を A/D 変換し UART にてパソコンに出力し

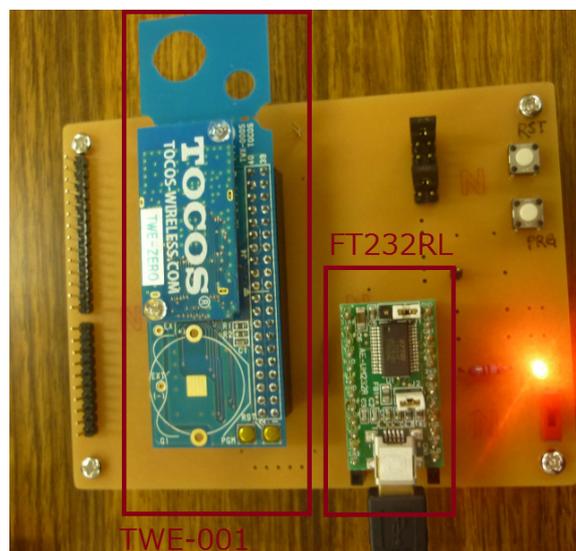


図 1. 作成したテスト回路

た。最後に、A/D 変換結果を無線で送信するため無線機能を追加、親機に接続されたパソコンにて正しく送信が出来ていることを確認した。

以上より、UART、タイマー、A/D 変換、割り込み処理、無線通信について実際にプログラミングを行い、理解を深めることが出来た。

・実習② 東京コスモス電機提供の ToCoNet スタック API を利用したレイヤーツリー型ネットワークの理解

IEEE802.15.4 のネットワークで特長となる中継（ルータ）機能について学ぶ実習を行った。通常、中継機能を加えるとネットワーク上での手続きが増えるため、プログラミングも複雑になるが、ToCoNet では機能やネットワーク構造等を限定する事で、中継機能を比較的簡単に扱えるようにしている。

以下の課題を通じて中継機能に関する理解を深めた。

(1) サンプルプログラムから出発して、ブロードキャスト/ユニキャスト、

メッセージプール機能、タイマー/スリープといった機能と操作を理解

(2) レイヤーツリー型のネットワークの中で、自分の発信したデータの経路情報を取得

※UART：マイコンで一般的に使われる非同期シリアル通信方式。(Universal Asynchronous Receiver Transmitter - 汎用非同期受信・送信回路)の略。パラレル信号をシリアル信号に変換し、またその逆を行う機能を持つ。

4 研修後 - 実業務での適用

今回の研修を受講する前後の業務の一つに、真空容器内を真空引きする作業がある。この工程は非常に重要で、ステンレスやガラスの壁面についた水分などを十分に取り除かなければ、徐々に壁面から出てきた水分により圧力上昇が生じる。そのため、真空引きの際にリボンヒータなどで加熱し壁面についた水分を除去する方法が効果的である。微細な調整・最適化のため、ヒーター部分の温度、真空度、雰囲気温度を監視する必要があった。しかし、実験室と居室は離れており、温度と真空引き中の真空容器の圧力を確認するためだけに実験室と居室の往復は非効率的であった。この作業は少なくとも 2 ~3 日間かけて丁寧にやったほうが良く、経過は非常にゆっくりである。この経験を踏まえ、今回の研修で使用した ZigBee が、省電力で 4 つの 12 bit A/D 変換データとチップ内蔵温度データを送受信できる点から、有効に使用できると考えた。今回は 4 地点の温度データを実際に即席で収集できるようにする。

4.1 ネットワーク構築

研修では、一定のタイミングごとに A/D 変換結果を親機に送るプログラムを作成し、実際の動作確認を行なった。研修後、ベースプログラムを用いて親機側のデータを受信するプログラムの作成を行なった。これによりネットワーク形態としては、スター型（図 2）となり、4 個の子機がそれぞれ、チップ内蔵温度、A/D 変換後のデータを親機に送信する。親機は受信に特化し、受信したデータをシリアル通信でパソコンにデータを送る。この一連の流れを繰り返すことで、取得したデータを一定時間ごとに記録していくことが可能になった^{[4][5][6][7]}。

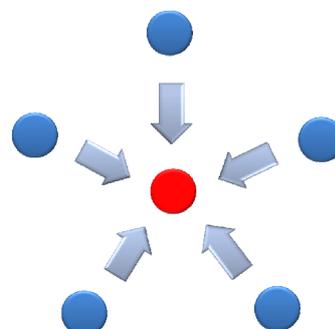


図 2. スター型構造

4.2 通信範囲の測定

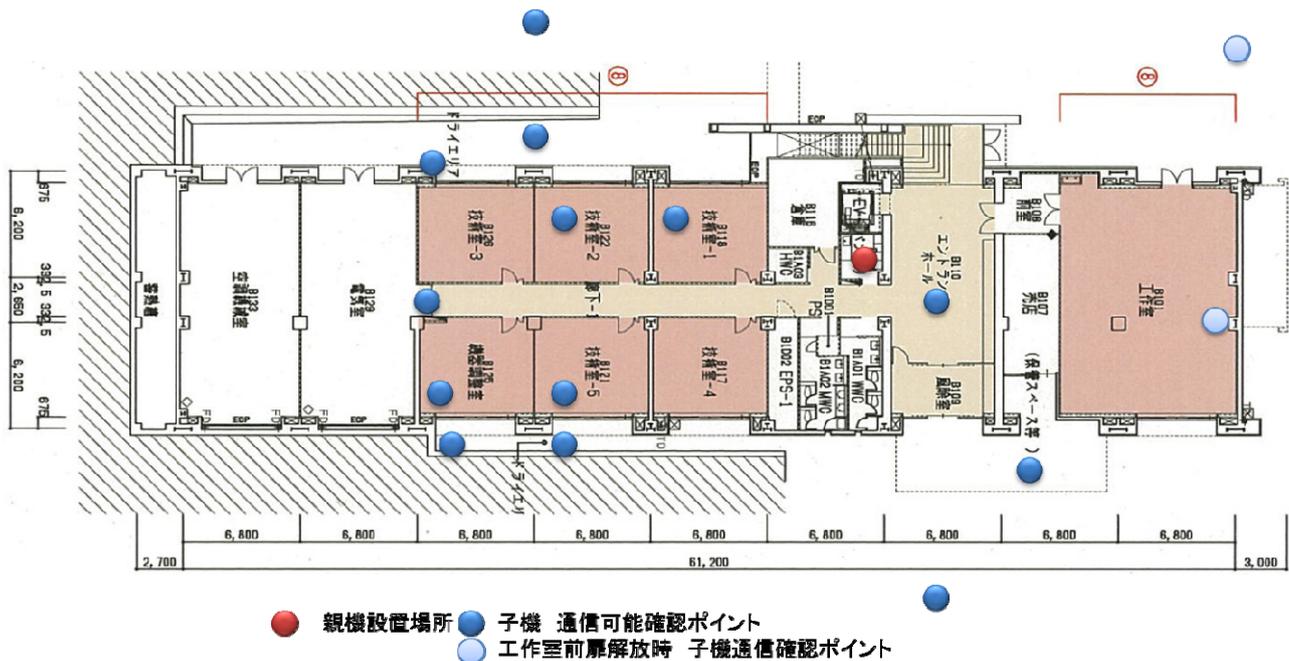


図 3. 通信可能エリア

スター型のネットワーク構築の確認は出来たが、子機 4 台はまとめた状態である。子機が、親機に対してどの程度離れた状態で通信できるかテストした。可能エリアを探す際に、データを送信前に通信確認のため子機から親機に送信し、親機からの返信を子機が受信して初めて、子機からデータを送信する。データ送信時から次の通信確認までの間デジタル出力を ON にし、LED を点灯させるようにした。これにより、通信が確定している状態にあるか子機のみを確認すれば良いことになる。

親機を居住スペースの中心近く（電源を確保できる場所）に設置し、子機を持ち歩き送受信できるか確認することで実使用範囲を選定した。図 3 は、研究所共同館 1 F での送受信可能ポイントを表している。赤丸が、親機を設置した場所で、濃青丸が子機で送受信できたポイントとなる。薄青丸は、工作室前の分厚い扉を開けた状態で通信可能な場所になる。1 階は、一部を除き送受信することができた。ある程度部屋から離れなければ外でも送受信可能であった（窓ガラス - ワイヤなし）。また 1 階に親機を設置したままの状態、2 階部分では廊下は完全に通信可能であった。3 階については、階段付近まで通信可能であった。親機から一番離れた部屋の隅など遠く離れた場所の場合、通信が切れそうになる場合があった。その時、通信モジュールを立てることで受信状態が安定した。無方位型アンテナを使っているが、送信側と受信側両方のアンテナを平行にすることでより遠くまで良好に受信できるようになった。正確に可能エリアを調査したい場合などには、”ネットワークディスカバリーツール” を用いて、PER(Packet Error Rate)を測定することで通信品質を確認できる^[4]。

4.3 子機の小型化

送受信可能エリアを探した際、研修で作成した評価基板は、パソコンなどの USB ポートからの電源電圧供給になり、全体として大きくなる。また 4.2 で通信確立時に LED を点灯させるようにしたので、それらの部品も含めて一枚の基板にした。また本体モジュールは、プログラム書き換える時や、取得データをパソコンなどに送る時は、シリアル通信を用いる。研修での制作では UART から USB に変換するモジュールも取り付けたが、子機で取得データを無線通信で送信する場合必要ない。図 4 は、モジュールなど実装済みの基板（大

きさ[mm]: 50×70×20) で、送信専用の基板を作成した。電源はより小型化するためにボタン電池(CR2032)を使用した。これにより、自由にどこにでも設置しやすくなった。この小型子機基板を使うことで、通信可能エリアも確認しやすくなった。

ボタン電池を使用しての使用可能期間(電池寿命)の測定を試みた。一度の送信内容に電源電圧値が含まれているので、この電圧値をモニタした。すると予想以上に電圧値が下がり、電圧値が2V程度に落ちると通信できなくなった。1秒間隔での送信では半年は電池がもつはずであるが、LEDをつけていたため、送信時電流(20mA)及びLED電流(3mA)3個分

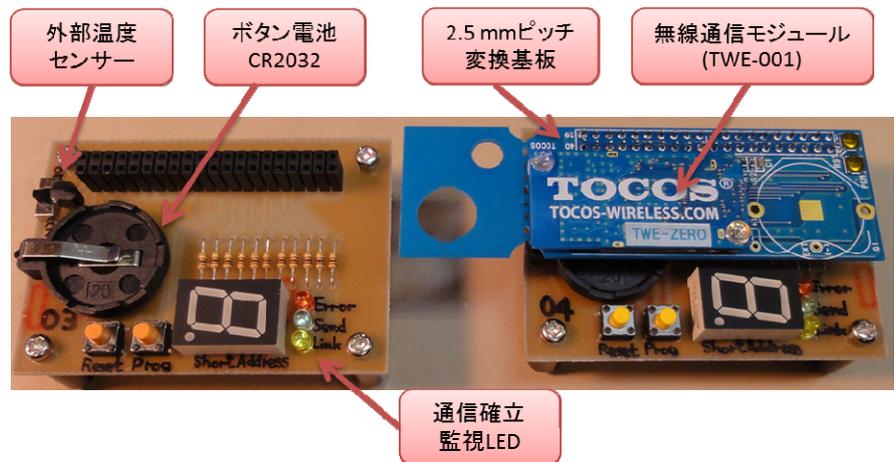


図4. 小型子機基板の作成

が少なくとも必要で、29mA必要になった。そのため数時間で電池容量がなくなり、通信できなくなった。通常よく手に入るボタン電池(CR2032など)自体の標準放電電流が多くて0.2mA程度で、最大パルス放電電流値でも15mA程度である。これ以上の電荷が必要になる際は定格容量を出力できない。そのため、対策としてコンデンサを挿入し電流を貯めておき、送信時にはコンデンサからの放電を利用することで運用できると記してあった。無線パケットを送信する時間は、データ容量から考えると小さいので100μFあれば十分である^[4]。また1秒間隔の送信から、10秒間隔の送信に変更し、スリープ機能(RAM保持スリープ+ウェイクアップタイマー)を設定し、消費電流(スリープ時0.46mA、通常時19mA):マルチメータによる測定)を下げる設定を行った。これらの対策により、消費電力が下がり、より長い時間通信ができるようになった。

4.4 遠隔地での手軽な温度測定

送信データの中に、チップ内蔵温度センサーのA/D値が入っている。このセンサーの値がある程度正確な周りの雰囲気温度を示すのではと思い、週末の期間試しに動かしつつけたが居室の温度(室内温度計による)が13℃程度でも、センサーからの信号は25℃前後をずっと保持していた。図5は、冷凍庫内のチップ内蔵温度センサーによる測定温度と熱電対による測定温度の比較である。横軸は時間で、縦軸はそれぞれのセンサーによる測定温度である。室温と比べると

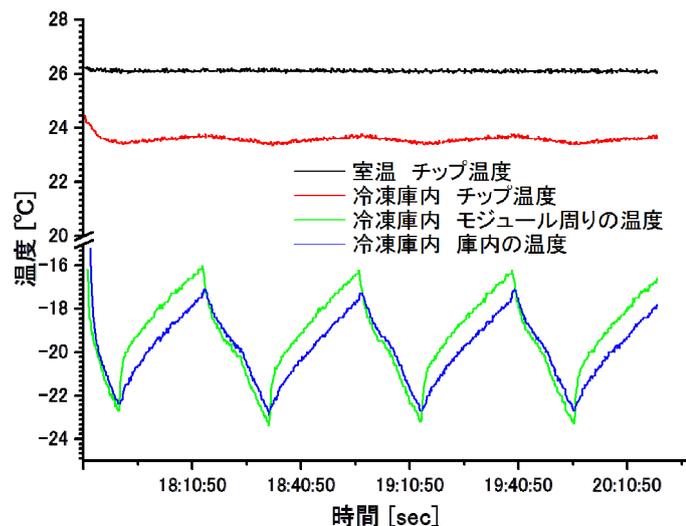


図5. チップ内蔵温度センサーと熱電対による測定温度の比較

2℃程度は低くなるものの正確な値とは大きくずれている。チップ内蔵温度センサーの測定値は、一定であるのが正常で、測定値が下がった場合などは周りの温度が急激に下がっている時などと考え、エラー出力として利用可能であると判断する。そのため雰囲気温度を測定するには、外部に温度センサーが必要になる

ことが分かった。通信可能エリア内であれば、小型子機基板を設置するのみで簡単に周りの温度を測定できることを確認できた。図6は、子機からのデータを受信し、テキストベースで表示していたものを、Microsoft Visual C# 2010 Express を用いて、実時間表示させるようにした。親機(Coordinator)と子機(End Device 1~4)のそれぞれの取得値をまとめて表示し、チップ内蔵温度センサーによる温度をグラフ化させ見やすく表現した。

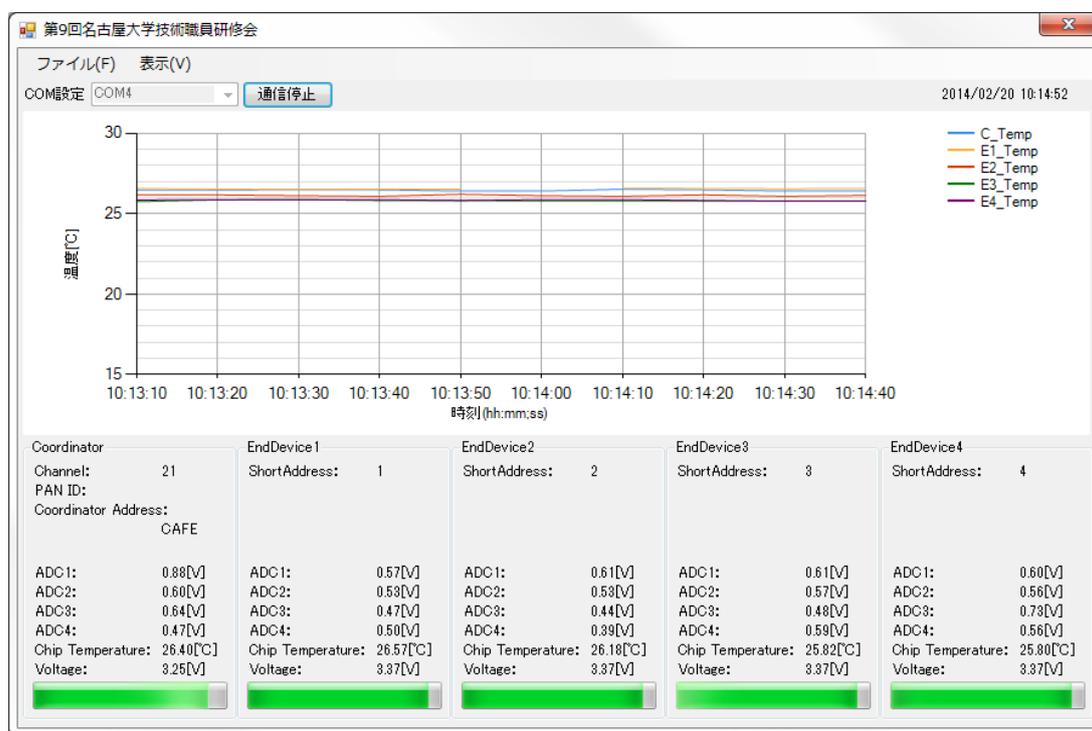


図6. ZigBeeによるデータ取得用のフロントパネル

5 まとめ

今回の研修を通して、ZigBeeの基本性能を理解した。その性質の中で、省電力の無線機器であることに着目すると、利用すべき点は、手軽にそして即席で多点のセンサー類の測定値を収集できることだと考えた。我々のような実験系で使用する場合、ツリー、メッシュ構造までは必要なく、スター型の構築で十分利用出来ると判断した。現地調査や実験項目の一部に利用可能であると期待している。実験例として子機の小型化を行い、ZigBeeを4個とパソコンでデータ取得することを試み、使用可能なことが分かった。

参考文献

- [1] 提坂秀樹、大庭秀雄，“テキストブック無線通信機器”，日本理工出版会，2007年3月
- [2] 津田良雄，“実用デジタル無線技術”，一般財団法人 情報通信振興会，2012年10月
- [3] 後藤尚久、中川正雄、伊藤精彦，“アンテナ・無線ハンドブック”，オーム社，2006年10月
- [4] TOCOS 技術情報 (<http://tocos-wireless.com/jp/tech/index.html>)
- [5] Integrated Peripherals API User Guide (Jennic)
- [6] Wireless Networks User Guide (Jennic)
- [7] IEEE 802.15.4 Application Template (Jennic)

謝辞

名古屋大学技術職員研修で講師をして下さった皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。