電力線通信を用いた建設現場 ICT インフラ構築技術の開発

株式会社竹中工務店　西野　高明
熊谷　健児
小野　孝一
宮口　幹太
井上　竜太

1. はじめに

近年、建設業ではモバイル端末、センサー、ネットワークカメラ、ロボット等の ICT 活用による生産性向上への期待が高まっている(図 1)。しかし、建設現場では、キャリア通信(3G,LTE 等)の電波が届かない場所が多く存在している。成熟した大都市では、電波の届きにくい高層階や地下階での作業が必要となる大規模ビルの建設も多い。また、キャリア通信の電波が弱い地域への施設やインフラの建設も、建設業が担う大きな責務となっている。これらの建設現場では、仮設の有線・無線 LAN 環境を追加整備するためのコストや工期が必要であり、ICT インフラ(ネットワーク環境)を簡易に構築する手段が望まれていた。

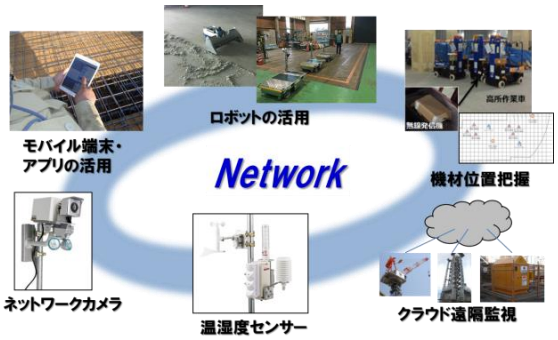

図 1、建設現場における ICT 活用

そこで我々は PLC(電力線通信; Power Line Communication)に着目した。PLC とは、交流電源に高周波(IEEE 1901 HD-PLC[(1)]では 2MHz～30MHz)の信号を重畳させ情報通信を行う手法である。現場に予め敷設されている仮設電源を用いて PLC を行えば(図 2)、LAN 配線や小型アンテナ設置等に比べ簡易・低コストにネットワーク環境を構築できる可能性がある。

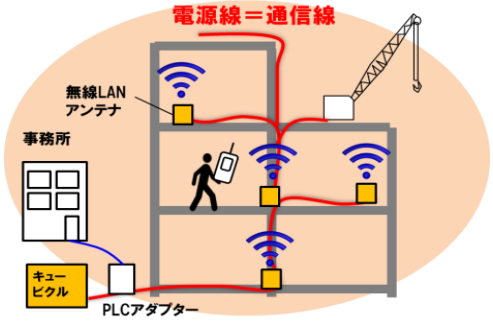

図 2、PLC 活用イメージ

本報では、建設現場への PLC 導入に向けて挑戦した一連の開発と展開について述べる。

2. 課題抽出と検討項目の設定

現場への PLC 導入の課題を抽出するため高層ビルの施工現場で通信速度測定を行った。30 フロア全階の仮設分電盤に PLC アダプターを設置し、1 階から各階への通信速度を測定した(図 3)。

図 3、 PLC 通信速度測定実験

測定により、分電盤通過に伴う通信速度低下(課題 A)、夜間に比べ電気使用の多い日中の通信速度低下(課題 B)という 2 つの課題を抽出した(図 4)。また、機器・設置・課題対策のコスト明確化・削減を課題として設定した(課題 C)。

次に社内各部署にヒアリングを行い、上記 3 つの課題に対して、達成すべき水準として表 1 の目標を設定した。また検討項目を以下のように絞り込んだ。

(1) 通信速度に対する課題 A、B に対し、要因の究明を行う。

（2） 電源線・分電盤をモデル化し、PLC 伝送特性の解析技術を確立する。
（3） （2）で確立した解析技術を用いて、（1）で分析した課題の対策技術を構築する。
（4） 対策費用含む機器・設置コストを明確化し、低コストの対策技術を探索する。

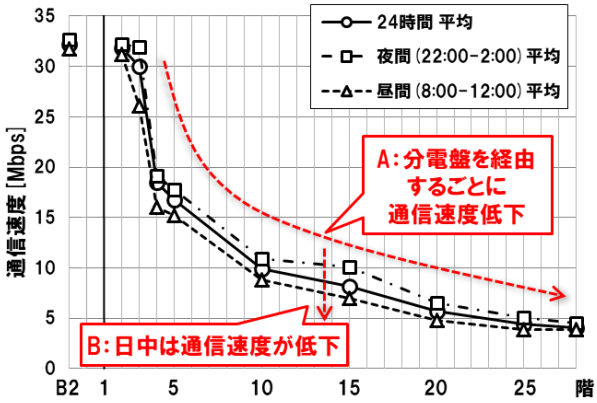

図 4、実験結果

表 1、目標水準

課題	目標水準
A：分電盤による通信速度低下の抑制	通信速度 10Mbps 以上確保
B：日中の通信速度低下の抑制	
C：機器・設置のコスト明確化・削減	LAN 配線に比べてコスト 1/2

3. 検討内容

（1） 通信速度低下の要因究明

課題 A,B の通信速度低下の要因を特定するため、仮設分電盤を 10 台並べ、漏電遮断器（以下、ELB）の OFF・ON、及びコンセントへの負荷の接続無・有で PLC 通信速度が変化するかを確認した（図 5）。ELB ON 時、負荷接続時にそれぞれ通信速度が大きく低下しており、課題 A の要因が ELB の影響であり、課題 B の要因が分電盤へ接続される機器の電源ノイズの影響である事を明らかにした（図 6）。

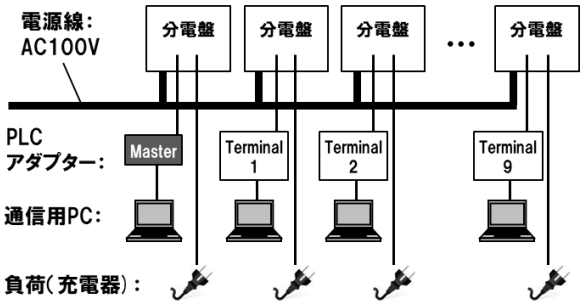

図 5、 要因特定実験

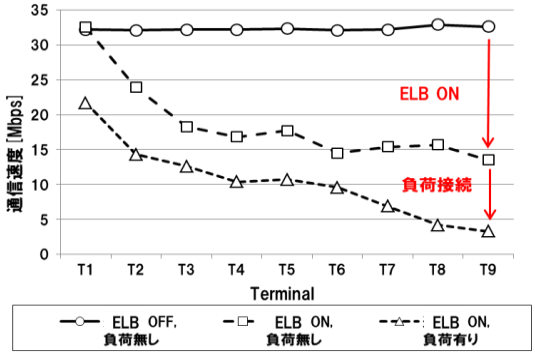

図 6、実験結果

また、ELB がなぜ通信速度に悪影響を及ぼすかを突き止めるために、ELB を分解して分析したところ、漏電検知回路の電源にコンデンサ等の容量成分を持つ部品が搭載されていた。ELB の伝送特性をネットワークアナライザで測定すると、上記容量成分により PLC の通信帯域 2MHz～30MHz でインピーダンスが低下していた（図 7）。このことから、「ELB の容量成分によって PLC の信号が吸い取られる」ことが課題 A の要因である事を突き止めた。

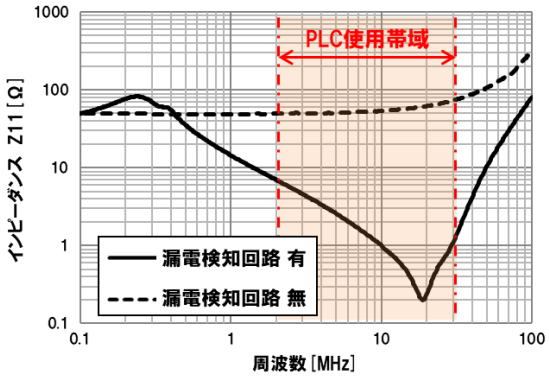

図 7、 インピーダンス特性

（2） PLC 伝送特性の解析技術の確立

電灯系統で用いられる 3 線単相の電源線に伝送線路理論を適用して、配線の長さ、太さ、間隔、被覆の誘電率から PLC 信号の減衰特性を導出可能なコンポーネントモデルを作成した。また、ネットワー

クアナライザで抽出したパラメーターより ELB のコンポーネントモデルを作成した。そしてこれらを接続して分電盤全体のモデルを構築した（図 8）。これにより配線構造を変化させた場合や、ノイズフィルターを任意箇所に挿入した場合の伝送特性をシミュレーション可能とした。

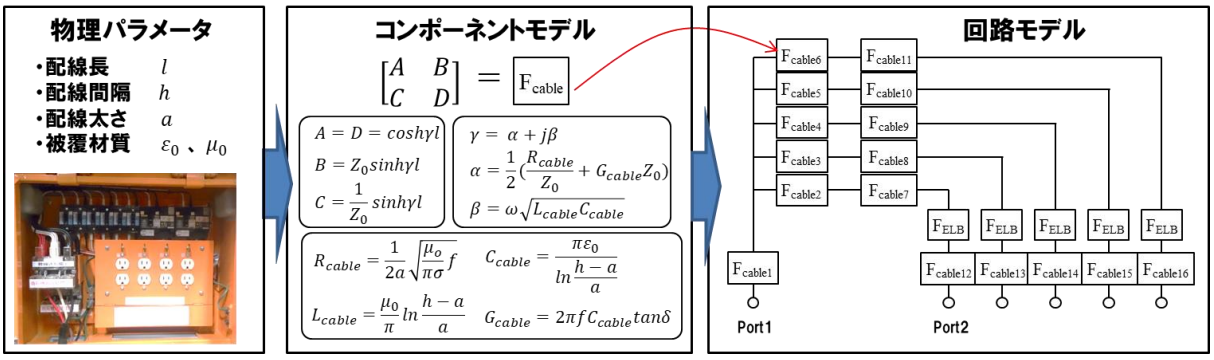

図 8. PLC 伝送特性の解析手法の確立

（3） 対策技術の構築

構築した分電盤のモデルを用いて対策案を検討した。従来の PLC 用ノイズフィルターはコンセントに挿す形式だが、この場合 PLC の通信経路である電源幹線と ELB が直接接続される（図 9(a)）。そこで電源幹線と ELB の間にフィルターを挿入する方式（図 9(b)）を考案し、解析および実測にて伝送特性が改善する事を確認した。解析・実測結果については4章で述べる。

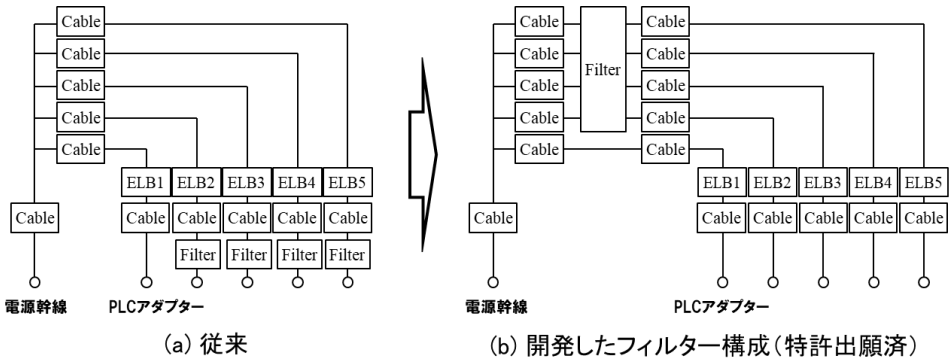

図 9、フィルター構成の検討

（4）機器・設置費用の明確化と対策の低コスト化

開発したフィルター構成に用いるノイズフィルターの探索を実施した（図 10）。従来の PLC 用フィルター（タップ型ブロッキングフィルター）では電流容量が足らず、大容量化するとコストが上がる。また、配線途中に後付けできないという課題もある。そこで、安価で配線に後付け可能なクランプ型フェライトコアに着目し、周波数に応じたコア材の選定や、次節で述べる磁気飽和対策の解析を実施する事で実用可能とした。

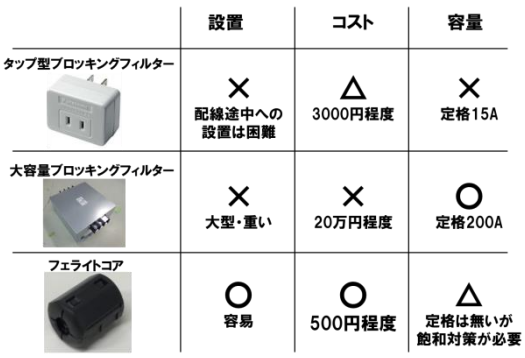

図 10、フィルターの比較

4. フェライトコアの飽和対策と解析技術

磁気飽和とは、印加磁界が強くなるにつれ磁性体内の磁区（磁気モーメント）の方向が一様になり、磁束密度が上昇しなくなる現象である。これにより、電流値が上昇するとフェライトコアのフィルター特性が劣化する。そこで、対策としてフェライトの一部にギャップ（空壁）を設ける必要があるが、このときの伝送特性は材質、内外径と配線径、ギャップ厚等により変化するため、解析で事前に伝送特性を推定す

る手法を検討した。

図 11 に示すような無限長の系において、両電源線のつくる磁束はアンペアの法則より次式で近似できる。

$$\Phi = \int_{S_1} \vec{B}_T d\vec{s} + \int_{S_2} \vec{B}_T d\vec{s} + \int_{S_3} \vec{B}_T d\vec{s}$$
$$\cong \int_{r=a}^{r=d} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr + k \int_{r=d}^{r=D} \frac{\mu_0 \mu_{rf} I}{2\pi r} dr + \int_{r=D}^{r=h-a} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr + \int_{r=a}^{r=h} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr \quad (1)$$

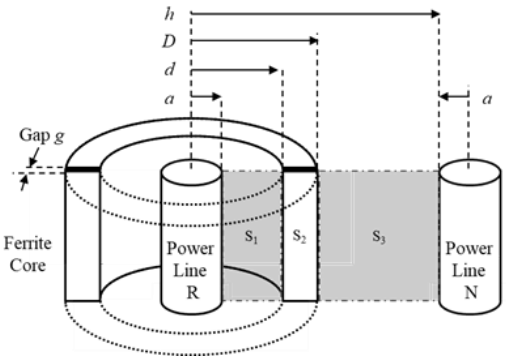

図 11、フェライトコアのモデル

ここでμ_{rf}はフェライトコアの複素比透磁率※1、I は電源線を流れる電流である。これよりフェライトコア設置部の外部インダクタンスL_fは下式となる。

$$L_f \cong \frac{\mu_0}{2\pi}\left\{ln\frac{(h-a)^2 d}{a^2 d} + k\mu_{rf}\ln\left(\frac{D}{d}\right)\right\} \quad (2)$$
$$k = \frac{R_{m1}}{R_{m1}+R_{m2}} \cong \frac{2\pi(d+D/2)}{2\pi(d+D/2)+\mu_{rf}g} \quad (3)$$

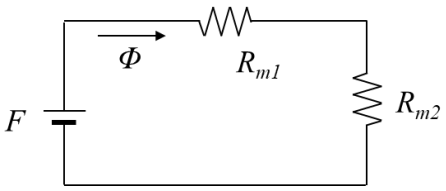

図 12、 磁気回路

係数kはギャップ有/無におけるフェライト中の磁束の比である。ここで、本モデルの磁気回路は図 12 のように表すことができる。R_{m1} ,R_{m2}はそれぞれフェライト部分、ギャップ部分の磁気抵抗、Fは起磁力である。起磁力Fが一定のとき、磁気回路の磁束 Φ は磁気抵抗の大きさに反比例するため、係数kは式(3)で表せる。

また、単位長さあたりの伝送線路パラメーター(キャパシタンスC_f、抵抗R_f、コンダクタンスG_f及びインピーダンスZ_f、アドミタンスY_f)はそれぞれ下式で表せる(2)(3)。

$$C_f = \frac{\mu\varepsilon}{L_f} \cong \frac{2\pi\varepsilon_0}{ln\frac{(h-a)^2 d}{a^2 D} + k\frac{1}{\varepsilon_{rf}}ln\frac{D}{d}} \quad R_f = \frac{1}{2a}\sqrt{\frac{\mu_o}{\pi\sigma}f} \quad G_f = 2\pi f tan\delta \quad Z_f = R_f + j\omega L_f \quad Y_f = G_f + j\omega C_f \quad (4)$$

上記のパラメーターより、ギャップを有するフェライトコア設置部配線のコンポーネントモデルを求めることができ、図 9 に示した回路モデルに挿入して解析を行う事が可能となる。

フェライトコア単体の解析結果を図 14 に示す。ギャップ有無で実測と解析の結果は良く一致している。ここで S_{21} は伝送における減衰特性であり、値が低いほど減衰が大きいことを示す。また、図 9 の分電盤モデルで、フェライトコア有無による特性の変化を解析・実測した結果を図 15 に示す。考案したフィルター構成では伝送特性が大きく改善している。

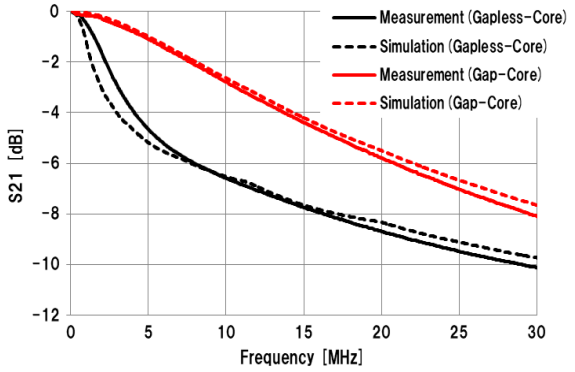

図 14、フェライトコア単体　解析結果

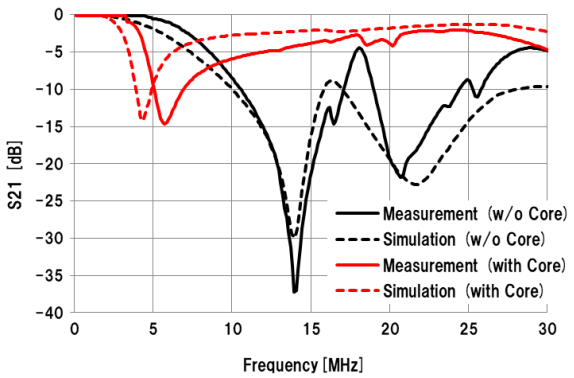

図 15、分電盤モデル　解析結果

5. 成果および効果の確認・検証

(1) 開発したフィルター構成の効果検証

開発したフィルター構成の効果を確認するため、3 章(1)と同様の構成(図 5)にて、フィルターの有無による PLC 通信速度の変化を測定した。測定より、ELB 及び電源ノイズの影響で 3.3 Mbps に低下した通信速度が 24Mbps まで大きく改善する事を確認した(図 16)。

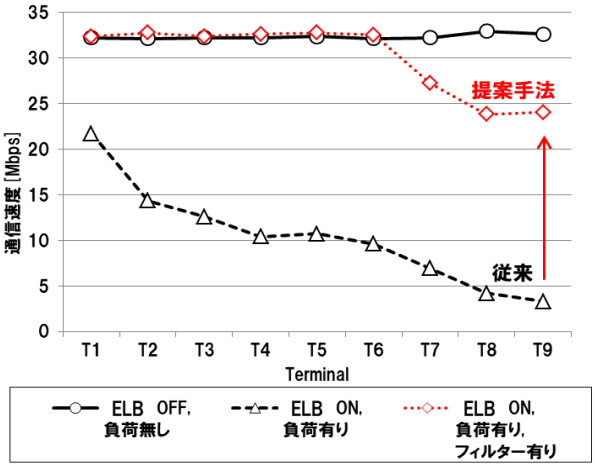

図 16. 開発技術の効果

(2) アプリケーションの検証

次に、建設現場にて開発技術を導入・運用し、現場からニーズの声が寄せられたアプリケーションに PLC が適用可能である事を確認することとした。都内複合施設の建設現場では、分電盤 8 台に本技術を組み込み、現場内天井に設置した 360 度カメラの動画像をリアルタイムに配信・記録して遠隔地からタブレットや PC で現場内の状況を把握できるシステムを構築した(図 17)。九州にある商業施設の建設現場では、キャリア電波の届かない箇所が存在したため本技術を導入し、PLC による無線 LAN 環境を構築した。検証の結果、現場内全域において 10Mbps 以上(PLC 親機からの通信速度)が得られた(図 18)。

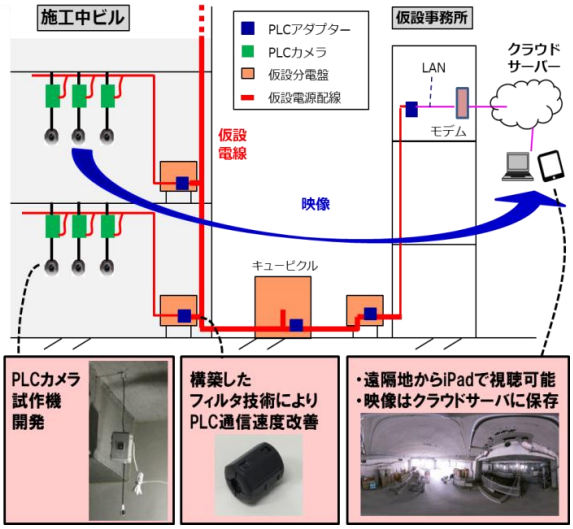

図 17、PLC による現場内モニタリング

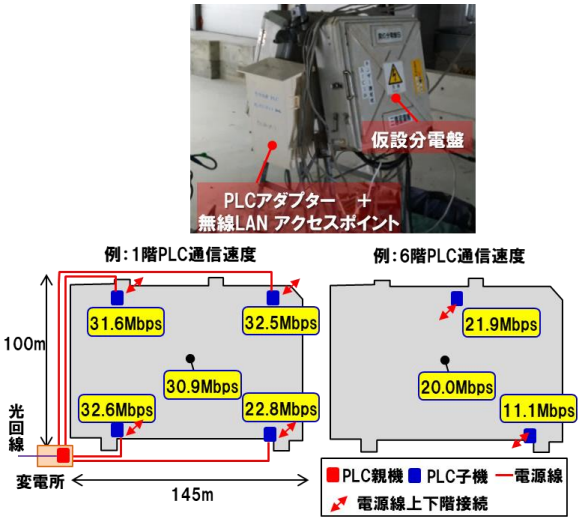

図 18. PLC による無線 LAN 環境構築

(3) コストの検証

仮設電気工事業者へのヒアリングから、有線 LAN 敷設と開発技術による PLC を実施した場合とで、コスト比較(試算)を実施した(図 19)。仮設事務所から同一敷地内の、300m 離れた地上 30 階建てのビル施工現場各階へ通信するものとして試算した。工事進捗に伴い 1F ごとに盛替え(増設)が発生すると仮定し、また通信費等は含めず通信経路のみを対象とした。試算結果より、フィルター

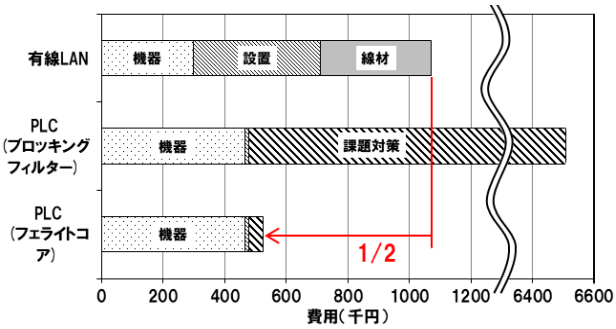

図 19、コスト比較

の選定によって対策コストを大幅に削減でき、有線 LAN と比較して機材・設置コストを 1/2 に低減できることを確認した。

以上より、表 1 に示した目標水準を全て達成した事を確認できた。本技術の開発によって、PLC の建設現場での活用が可能となり、LAN 配線を敷設する事なく簡易にネットワーク環境を構築できるようになった。

6. 成果の展開

現場検証を通じて、PLC アダプター、フィルター、無線 LAN 基地局等の設置方法を仮設電気工事業者に都度指導しなければならないという新たな課題を抽出した。そこで上記機器を組み込んだ、設置するだけでネットワークに繋がる“IoT 分電盤(仮称)”を仮設分電盤メーカーと共同で開発した(図 20)。これにより、無線 LAN, 照明・デジタルサイネージ制御および機材位置把握システム等を容易に活用できるようにした。今後、社内外の建設現場へ展開を行う予定である。

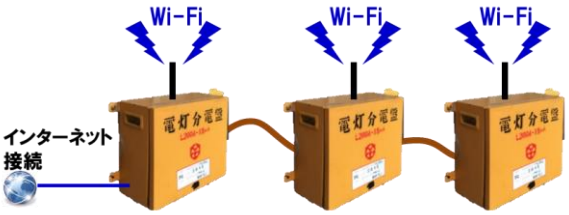

図 20、IoT 分電盤イメージ

7. おわりに

解析技術を駆使して開発したフィルター構成を用いて、PLC の建設現場への適用を実現した。今後も IoT 分電盤の導入を通じて、建設現場での ICT 活用による生産性向上・品質向上を推進したいと考えている。また本技術は建設現場以外でも、設備やインフラの維持管理, 防災, 防犯など様々な分野に展開できる可能性がある。まちづくり、そしてそこに住む人々の暮らしを支える ICT の基盤とすべく、本技術の開発を推進していく所存である。

【用語解説】

※1 「複素比透磁率」… 物質の磁気的性質を表す、材料固有の定数である。材料中に発生する磁束密度$B(\omega)$を、材料に印加した交流磁界$H(\omega)$で除す事で得られ、下式のように実部と虚部で表すことができる。

$$\mu_r = \frac{B(\omega)}{H(\omega)}\frac{1}{\mu_0} = \frac{\mu'}{\mu_0} - j\frac{\mu''}{\mu_0} \qquad (5)$$

【参考文献】

(1) “IEEE 1901-2010, IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks”, IEEE, 2010
(2) 北山匡史,“高速電力線通信における伝送特性シミュレーション”, IEEJ Trans. EIS. Vol.127, No.8, 2007
(3) Clayton R. Paul, 佐藤利三郎(訳), “EMC 概論”, ミマツデータシステム, 1996