

# ポンプ常時モニタリングシステム向け ネットワークシステムの開発

川本 康貴      小林 啓洋

2012年の笹子トンネル崩落事故以来、我が国ではICTを利用したインフラ維持管理・更新・マネジメントに関する研究開発が活発になっている。例えば各省庁が積極的にICTを利用した社会インフラの維持管理技術の開発に注力している<sup>1)</sup>。

病院や地域エネルギー供給システムといった公共性の高いインフラシステムは、安全かつ持続的に利用できることが望まれる。そのためにはシステムの中核である発電機やボイラ、ポンプなどの駆動機器、回転機器の異常を早期に検知し、機器が本格的に故障する前に修理をしてシステム全体の健全性を確保することが重要である。

機器異常の早期検知には機器の状態を常時モニタリングするシステムの導入が効果的であることがわかっている。しかしながら、このようなシステムはケーブル敷設等の導入コストが高く、普及には至っていない。

これらの情勢を踏まえ、我々は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務として、発電機やポンプの完全ケーブルレス常時モニタリングシステムを研究開発中である<sup>2)</sup>。本稿では開発中のシステムの内、特にOKIが担当するネットワークシステムに関する研究開発を紹介する。

## ポンプモニタリング向け無線ネットワークへの要求

インフラとしての信頼性が求められるポンプや発電機といった駆動機器の常時モニタリングシステムを普及させるためには、システムの導入コストを下げる必要がある。システム導入コスト削減には、通信配線や電源配線を無くした「システムの完全ケーブルレス化」が効果的である。完全なケーブルレス化を実現することで、配線の敷設費用が削減されるだけでなく、モニタ用センサーの設置容易性も高まりシステム全体の導入コストが大幅に削減できる。

モニタリング対象となるポンプ等が設置されている環境は、パイプや他の設備といった多くの遮蔽物が存在する。このような環境で通信の接続性および信頼性を確保するためには、センシングしたデータを無線で中継す

るマルチホップ機能が必要である。また、電源配線をなくすためにはデータを中継する無線機も電池で動作する必要がある。

以上のことから、ポンプモニタリング用のネットワークを完全化するためには、中継機も含めて電池動作可能な省電力無線マルチホップネットワークプロトコルを開発する必要があった。

## システム構成

本開発システムの構成を図1に示す。

ポンプ振動の周波数特性をモニタリングすることで、異常発生を早い段階で検知できることがわかっている<sup>3)</sup>。

例えば、ポンプのねじが緩んでいる場合や回転軸がずれている場合はポンプの回転周波数のN倍成分が強くなる。

ポンプ等の監視対象機器には無線機能を持つ圧電振動センサー（以下、センサー）を取り付ける。このセンサーはポンプの振動で発電するエナジーハーベスティング機能を持ち、発電した電力が一定量たまるとセンサーデータ収集機へ信号を送信する。ポンプに異常が発生して振動の周波数特性が変わるとセンサーの発電量が変わり、その結果センサーからの信号送信間隔が変わる。センサーからの信号送信間隔を測定することで、ポンプの異常検知をする。

一般的な現場では、ポンプの近くにはメンテナンス用のコンセントが用意されている。センサーデータ収集機はこのコンセントを利用して動作する。センサーデータ収集機はセンサーからのデータを収集してタイムスタンプをつけてセンサーデータ中継機や基地局へ転送する。

センサーデータ中継機はバッテリーで動作しており、センサーデータ収集機からのデータを転送する機能を持つ。センサーデータ中継機のバッテリーとして想定されている電池容量は約2600mAh (CR123A型電池2本分) であり、動作期間は10年程度を目標にしている。

基地局へ集められたデータはログとして保存され定期的に解析される。

本開発システムでのOKIの担当はセンサーデータ収集

機および、センサーデータ中継機、基地局で構成する省電力な無線マルチホップネットワークプロトコルの研究開発である。

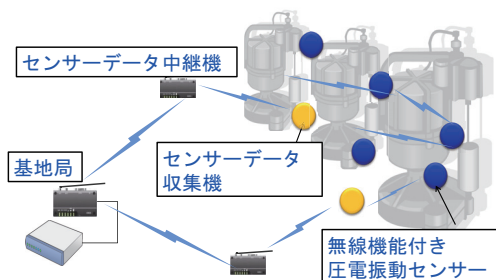


図1 ポンプモニタリングシステムのシステム構成

### 従来の省電力無線通信技術

電池を利用したの長寿命を実現するための省電力技術としてLPL (Low Power Listening) <sup>4)</sup>がある。LPLは受信側が間欠受信動作をし、送信側が受信側の間欠受信タイミングに合わせてデータを送信することで省電力通信をする方式である。IEEE802.15.4e<sup>5)</sup>で定義されているCSL (Coordinated Sampled Listening) もLPLをベースとした方式である。今回の開発ではCSLを採用している。

CSLの通信シーケンスを図2に示す。

送信側が受信側の間欠受信タイミングを知らない場合、データ送信はCSL非同期通信となる。これは送信側がデータフレームを送信する前にWakeupフレームを長期間連続送信する通信である。Wakeupフレームにはデータフレーム送信タイミング(「あと何msec後にデータフレームを送信するか」)に関する情報が入っている。受信側は間欠受信タイミング時にWakeupフレームを受信した場合、Wakeupフレーム内の情報に従ってデータ受信する。受信側はデータに対するAck内に情報を入れることで自身の間欠受信タイミングを送信側へ通知する。

送信側が受信側の間欠受信タイミングを知っている場合、データ送信はCSL同期通信となる。CSL同期通信のデータ送信方法は、データ送信前にWakeupフレームを連続送信する点ではCSL非同期通信と同じである。しかし、Wakeupフレームの連続送信期間が異なる。CSL非同期通信のWakeupフレーム連続送信期間は間欠受信期間(秒オーダー)より長く設定されていることが普通だが、CSL同期通信でのWakeupフレーム連続送信期間は20msec程度である。

何らかの理由で送受信間の同期が外れてCSL同期通信が失敗した場合、送信側はデータ送信時にCSL非同期通信をするようになる。

※ NES-MAC (NEtwork System lab's Media Access Control)

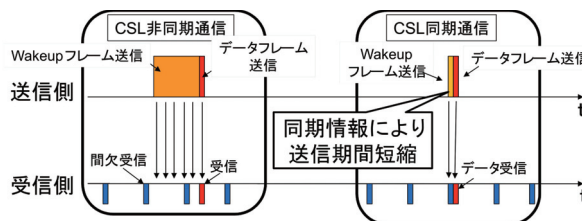


図2 CSLの動作シーケンス

### 取組みその1: クロック補正機能を持つ 時刻同期型省電力通信技術<sup>6)7)</sup>

CSL非同期通信時のWakeupフレーム連続送信期間はデータフレーム送信にかかる期間(msecオーダー)に比べて十分長く、オーバーヘッドが大きい。そのため、CSLを使って通信をする場合は同期を維持してCSL非同期通信を続けることが重要になる。

一般的にCSLの同期のためには通常の水素クロック素子(Clock Xtal Oscillator、以下CXO)を使う。CXOには20~30ppm程度の個体差や温度変化によるばらつきがある。前述の通り、CSL同期通信時のWakeupフレーム連続送信期間は20msec程度である。10分程同期間隔が開くと同期誤差が20msec以上になり同期を維持できなくなる。アプリケーションの要求以上の頻度で通信が必要であることは省電力の観点から見て課題である。

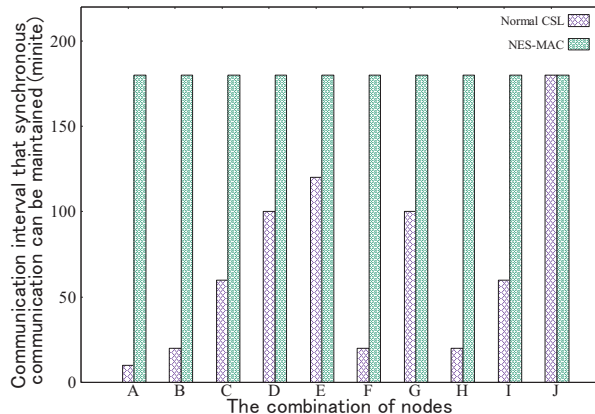
そこで通信時の微細な同期ずれからCXOの誤差を測定し、それをソフトウェアで補正する機能を持つ省電力無線通信プロトコルスタックであるNES-MAC<sup>\*</sup>を開発した。CXOの誤差を補正することによって、同期維持のための通信頻度を下げることができた。

NES-MACによる性能向上を明らかにするために、100台程度の無線機から無線機のペアを無作為にA~Jの10組選んで同期維持性能の測定実験をした結果を図3に示す。図3の横軸は無線機のペアを示し、縦軸はそのペアで同期維持が可能な同期通信間隔を示す。

CXOの誤差を補正せずにCSL通信をしたところ、同期維持ができる再同期間隔は、組み合わせにより5分~3時間のばらつきがあった(図3のNormal CSL)。例えばペアAの場合、CSL同期通信確立後、5分以内に再同期のための通信をしないと同期が外れてしまいCSL同期通信が維持できない。

しかし、NES-MACを利用した場合にはすべての無線機の組み合わせで再同期の間隔が3時間程度開いても同期が維持できていることが明らかになった(図3)。

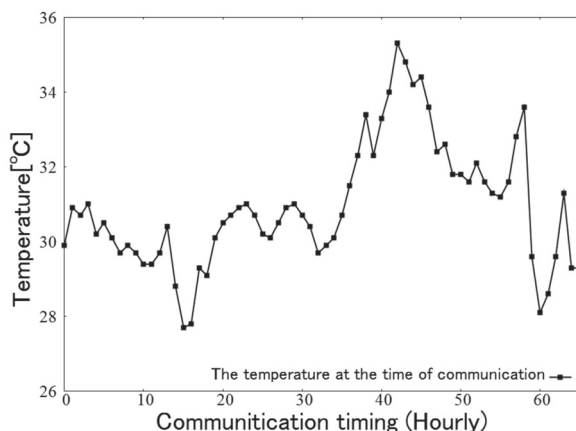
## 取組み その2： 輻輳回避やシステム長寿命化のための 子ノード平滑化技術<sup>8)</sup>



NES-MAC を利用するとすべてのノードで再同期間隔が3時間以上になっても同期が維持できている

図3 NES-MAC の同期性能の検証実験結果

CXOのクロック特性は温度によって変化する。NES-MACの温度変化への耐性を明らかにするために、温度変化がある程度大きい場所での通信実験をした結果を図4に示す。図4の横軸は通信回数、縦軸は通信実施時の気温を示す。実験では1時間に1回CSL同期通信を実施し、すべての通信で同期が維持できている。実験結果から、温度変化が1時間あたり4度以下であるならば、1時間に1回の通信で同期が維持できていることが確認できた(図4)。



温度変化が大きい場合(1時間に4度程度)でも1時間間隔の再同期で同期維持が可能

図4 温度変化がある環境での NES-MAC の同期性能

多くの無線マルチホップネットワークプロトコルでは、通信環境を元に各ノードが自律的に親ノード(=データ中継ノード)を選択してネットワークを構築する。よって、例えば通信環境の良い特定のノードに子ノードが偏るといった事態は頻繁に発生する。外部電源で動作する通常の無線マルチホップネットワークではこれは問題にならない。しかし、データを中継する親ノードがバッテリー駆動かつ省電力動作をする場合、このことは課題になる。

例えば、親ノードの電池が10年程度持つようにネットワークを設計しても、子ノードの偏りが生じて特定の中継機へデータ中継が集中すると、親ノードの電池が途中で切れてしまいシステムを長期間維持できない。また、CSLを使った子ノードは、受信側である親ノードが間欠受信するタイミングでデータ送信をするので送信が集中し、輻輳が発生する確率も高い。

そこで、こういった課題を解決するための子ノード平滑化プロトコルであるSSM (Statistical Smoothing Method)を開発した。SSMではネットワークのトポロジ情報を元に子ノードの数が他のノードに比べて著しく多いノードである「外れ値ノード」を見つけ出し、そのノードに対して子ノードの数を調整するようにコマンドを発行することで子ノードの平滑化を実現する。

平滑化を適切に実施するためには外れ値ノード検出方法が重要になる。子ノード数の標準偏差と平均値を利用した外れ値ノード検出方法は、今回のように外れ値の存在が想定されるデータの外れ値検出基準としては適切ではない。なぜなら、標準偏差や平均値といった値は外れ値の影響を受けやすいので検出すべき外れ値を見逃してしまう現象が発生するからである<sup>9)</sup>。

SSMでは外れ値ノード検出方法として、データの個数とデータ順序から外れ値を選別する箱ひげ図法<sup>9)</sup>を採用した。箱ひげ図法は、その外れ値の選別方法が外れ値の影響を受けにくいという特徴を持つ。箱ひげ図法を利用することにより、一般的な統計的手法を利用するよりも適切に外れ値ノードを検出できるようになった。

例えば、図5のように特定のノードに子ノードが偏っているネットワークに対してSSMを適応すると、図6のように平滑化される。机上シミュレーションの結果、子ノードの平滑化によって送信電力を最大二分の一に、輻輳発生率を最大四分の一まで低減できることがわかった。

本方式に関しては現在実装が完了し、近日中に実環境での実証実験を予定している。

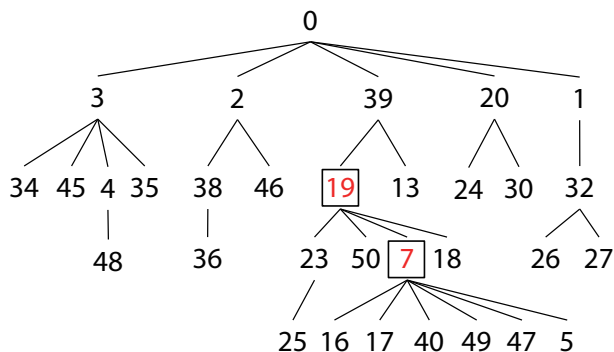


図5 初期状態 ノード19 および7に子ノードが集中

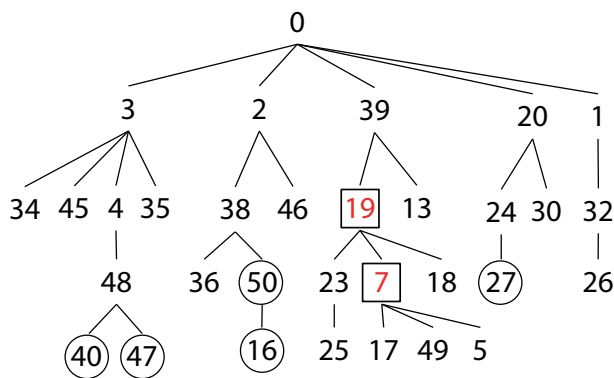


図6 平滑化実施後 子ノードが平滑化されている

## あとがき

ケーブル不要なポンプ常時モニタリングシステムの内、特にOKIが担当している省電力無線マルチホップネットワークに関する研究開発を中心に紹介した。本研究開発プロジェクトは2017年5月現在、5カ年計画の4年目である。今後は実環境での実証実験を通してシステムの検証および新たな課題対応を実施する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものである。 ◆◆

## 参考文献

- 1) [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra\\_roukyuuka/dai1/sankou.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai1/sankou.pdf) (2017/02/10)
- 2) <http://ucoms.la.coocan.jp/> (2017/02/10)
- 3) 横田伸夫：ポンプの異常診断と予知予防について、ター

ボ機械 16.8 (1988): 448-454.

4) Cano, Cristina, et al: A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs, IEEE Communications Letters 13.4 (2009)

5) <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4e-2012.pdf> (2017/03/15 Access)

6) 川本康貴、松永聡彦、門勇一：クロック補正機能による同期型省電力無線通信方式の性能向上に関する考察（短距離無線通信）、電子情報通信学会技術研究報告= IEICE technical report: 信学技報 115.189 (2015): 65-70

7) Kawamoto, Yasutaka, Toshihiko Matsunaga, and Yuichi Kado: Clock adjustment for a low power listening wireless infrastructure monitoring system, Internet of Things and Applications (IOTA), International Conference on. IEEE, 2016.

8) 小林啓洋他：省電力無線センサーネットワークにおける衝突確率低減手法（短距離無線通信）、電子情報通信学会技術研究報告= IEICE technical report: 信学技報 116.187 (2016): 19-24.

9) 野呂竜夫、和田かず美：統計実務におけるレンジチェックのための外れ値検出方法、統計研究彙報= Research memoir of the statistics 72 (2015): 41-53.

## ● 筆者紹介

川本康貴：Yasutaka Kawamoto. 情報・技術本部 研究開発センター スマートネットワーク技術研究開発部

小林啓洋：Akihiro Kobayashi. 情報・技術本部 研究開発センター スマートネットワーク技術研究開発部