

ノーマリーオフ知的バス停実運用を想定した 消費電力実装評価

新田健人^{†1} 長崎健^{†1} 戸田真志^{†2} 平田圭二^{†1} 松原仁^{†1}

本研究ではノーマリーオフオンデマンドバスシステムと専用の省電力知的バス停を設計し、バス停を構成する主要なデバイスである CPU、表示器、無線通信モジュールの消費電力を評価した。提案するバス停は、電池などの独立電源により、長期間メンテナンスフリーで稼働し続けることを目標としている。これまでに我々は、システムの実運用実験を行い、バス停周辺の人通りやシステムの利用頻度を明らかにした。今回は実際に主要デバイスを組み合わせ試験的にノーマリーオフバス停の実装を行い、前段階の実地実験から得た利用頻度のデータをもとに消費電力の評価を行った結果、本研究で提案するバス停が、独立電源で数年間運用可能な水準の消費電力であることを明らかにした。

1. はじめに

人口の少ない地方都市では、日常生活で利用できる公共交通機関がタクシーを除きバスしかなく、そのバスも本数や路線が限られており実用性に欠ける場合が多い。このような都市の中でも北海道七飯町は、図 1 に記すように最寄りのバス停から公共施設の距離が離れている、標高差があり長い坂道が続く、利用者の大半が高齢者である、という 3 点から特に交通過疎が問題となっている。

近年、地方都市における交通過疎問題の解決策として、オンデマンドバスの導入が注目を浴びている[1]。オンデマンドバスとは、特定の範囲内において利用者の依頼に応じた乗降地点、乗降時間より選定した経路を運行する形態のバスである。これには乗車する場所や行先の細かいニーズに答えつつ、利用者が少なくとも採算の取れる可能性が高いメリットがある。しかしその一方で、リクエストの増加による運行経路複雑化やダイヤの乱れ、電話やインターネットによる事前申込みの煩わしさによる利用率の低下等の問題を抱えている[2]。

本研究では、これまでに北海道七飯町をモデルとして、従来のオンデマンドバスが持っている問題を排除したオンデマンドバスシステムの設計を行ってきた。しかし、このシステムは表示器や無線モジュール等を搭載し利用者を導く専用の知的バス停を利用するため、導入や運用のコストが問題となる。特にこのような規模・用途の筐体を導入する場合には電力供給のための道路工事が必要であり、導入コストがとてつもないものとなる。そこで本研究では、工事にかかるコストを無くすためバス停の省電力化を目指す。もしこのバス停が省電力化により電池等の独立電源で稼働し、数年間のメンテナンスフリーが実現できれば、七飯町だけでなく多くの地域から必要とされるシステムとなることが期待される。

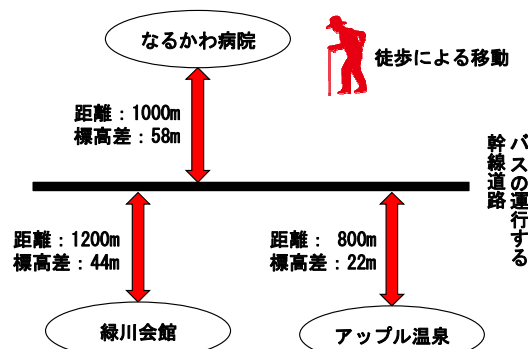


図 1 公共施設への接続 (北海道七飯町)
 Figure 1 Connection to community facilities

省電力化はバス停をノーマリーオフ化することで行う。ノーマリーオフとは使わないときには電源を切るという考えを示し[3]、近年コンピュータシステムの省電力化手法として注目されている。前段階の実験として、バス停ノーマリーオフ化の効果を見積もるために、周辺の人通りやシステムの利用頻度を調べる実地実験を行った[4]。七飯町のアップル温泉に 1 週間試験的にシステムを導入し、データを計測した結果、表 1 に記すように 1 日にバス停周辺では人感センサが 168 回程度反応する人通りがあった。また、11 回程度のバスの呼び出しがあり、最後に人を検出してから 1 分間でバス停の電源が切れるとすると、1 日に動作する必要のある時間は約 99 分であるという結果が得られた。本稿では、このデータを利用して消費電力の評価を行う。

表 1 バス停の人通りと利用頻度[4]

項目	頻度
人感センサ反応回数	168 回
バス停要求動作時間	99 分
バスの呼び出し	11 回
路線バスの運行	30 分に 1 本

^{†1} 公立はこだて未来大学
 Future University Hakodate
^{†2} 熊本大学
 Kumamoto University

2. システムとノーマリーオフ知的バス停

2.1 七飯町型オンデマンドバスシステム

本研究で取り扱うオンデマンドバスシステムは、図2に記すように、利用者が場所や時間を事前に指定する従来のオンデマンドバスとは異なり、公共施設の最寄りのバス停から公共施設までの間を枝状に接続する。このようにバスの運行ルートを変更することで、運行経路の複雑化を防ぎリクエストの増加に弱い従来のオンデマンドバスの弱点を克服することができる。また、オンデマンド運行自身も呼び出されたりいつでも運行するわけではなく、既存の路線バスへの接続を目的としたダイヤに合わせて行う。既存の交通機関との親和性を高めることで、顧客利便性を確保しつつ運行にかかるコストを削減することができる。

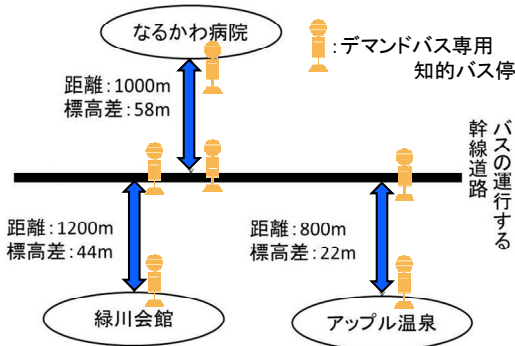


図2 運行経路とバス停
 Figure 2 Operation route and the bus stop

本システムでは通信機能を持つ専用のバス停からバスの呼び出しを行う。利用者がバス停の呼び出しボタンを押すと、運転手に自動で通知される仕組みである。従来のオンデマンドバスは電話やインターネットでの事前予約が必要となり、利用者から敬遠されてしまう懸念があるが、その場で呼び出しを行えるようにすることで積極的な利用を促す。バス停は、バスの時刻表表示機能、バスの呼び出し機能、待ち時間の表示機能を持ち利用者を導く。そのほかにノーマリーオフのための人検出機能を持ち、人が接近したときのみメイン機能を動作させることで低消費電力化を実現する。バス停の持つ機能を図3、システム全体の流れを図4に記す。

2.2 ノーマリーオフバス停

今回バス停は、CPUにRX63N、表示機として電子ペーパー、通信のための無線モジュール、人検出に利用する焦電センサ、バス利用者が押す呼び出しボタンからなるものを考えている。電子ペーパーは不揮発性の表示器であり、表示を変更するとき以外は電力を消費しないデバイスである。また、無線モジュールは1km程度の距離で通信が行え

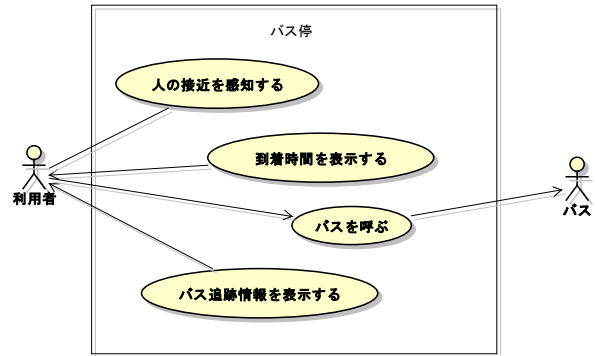


図3 バス停機能
 Figure 3 Function of the bus stop

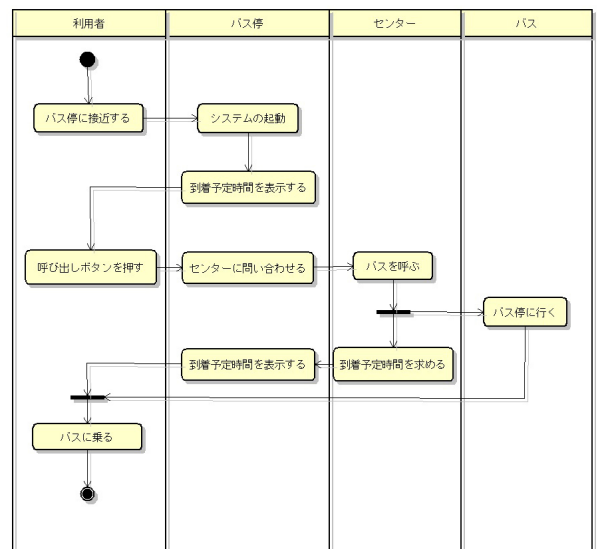


図4 システムフロー
 Figure 4 System flow

るものを想定している。各デバイスの制御はRX63Nが行う。図5はバス停の構成である。

システムレベルでのノーマリーオフとして、バス停が常時動作させる機能は人検出機能のみであり、人が接近したときのみメインのバス停機能を動作させる。その間利用していないデバイスの電源は、それぞれ個別で管理を行い遮断する。また、人の検出は焦電センサの値を読み取ることで行うが、その読み取りを周期的にノーマリーオフで動作させる。センサ値の読み込みを行う一瞬だけCPUを動作させ、その他の時間は電源を切る。人検出のためにセンサの値を読み取る頻度は0.5秒に1回程度で十分であり、CPUの復帰時間と処理時間を合わせても一度にかかる時間は数ミリ秒程度であることから、機能を動作させながらCPUはほとんどの時間を非動作状態であることができる。CPUのノーマリーオフにはRX63Nの低消費電力モードであるダイブソフトウェアスタンバイを利用する。これはCPUの

各端子の状態を保持するだけの最も電力を消費しないモードであり、標準的な消費電流は $22\mu\text{A}$ とほぼ 0 と考えることができる。RX63N 動作モードの仕様を表 2、バス停の各状態におけるデバイスの動作を図 6 に記す。

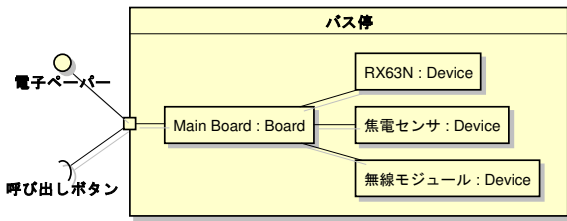


図 5 バス停のデバイス構成
 Figure 5 Structure of the bus stop

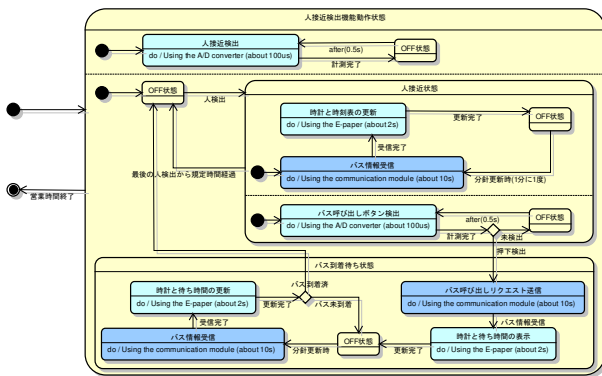


図 6 バス停の各デバイスにおける状態遷移
 Figure 6 State transition of each device

表 2 RX63N 動作モード

Table 2 Operation mode of RX63N

動作モード	Typ[mA]	Max[mA]	復帰時間[ms]
Operate	52	100	-
Sleep	25	65	0
Software standby	0.2	6	不定
Deep Soft standby	0.022	0.2	1.368

3. 実験

RX63N と焦電センサを搭載した評価基板上に、簡易的なノーマリーオフバス停アプリケーションの実装を行い、人検出処理と通信、表示処理に分けて消費電力の測定を行った。表示器と無線モジュールにはそれぞれ、Embedded Pico Systems 社の電子ペーパー TCM-P74-220_v1.1、と A&D 社の ZigBee モジュール AD1321 を採用し、評価基板上で利用できるよう拡張する回路を実装した。電子ペーパーと無線モジュールのカタログスペックを表 3 と表 4 に記す。電子ペーパーと無線モジュールは、RX63N から電力供給を制御しノーマリーオフで動作させた。いずれの実験も、電力の測

定はデバイスの電源ラインに直列に接続した 1Ω 抵抗の電圧降下を計測して行った。

表 3 電子ペーパー仕様

Table 3 Specifications of electronic paper

項目	数値	単位
型番	TCM-P74-220_v1.1	-
表示サイズ	7.4	Inch
解像度	480 x 800	px
表示画像容量	48016	bytes
SPI 最大転送速度	3	MHz
電源電圧	3.3	V
画面更新消費エネルギー	179	mJ

表 4 無線モジュール仕様

Table 4 Specifications of wireless module

項目	数値	単位
型番	AD1321-1MW	-
通信プロトコル	ZigBee Pro	-
出力電力	.001262	W/MHz
受信感度	-85	dBm
モジュール間通信速度	3.3	MHz
電源電圧	3.0	V
送信消費電流	34	mA
受信消費電流	32	mA

3.1 人検出機能

バス停アプリケーション人検出機能動作時の消費電流を測定した。人検出は焦電センサ値の差分を取ることで行った。プログラムの動作は図 7 に記すように、人を検出しない限り復帰、センサ値計測、スリープを一定周期で繰り返す。この実験では図の黄色い部分を人検出機能の括りとして消費電流の計測を行った。

図 8 が 1 度の復帰からディープソフトウェアスタンバイまでの消費電流計測結果である。CPU は復帰時に約 15mA 、復帰後の待機時に約 10mA 、動作時には 40mA 程度の電流を消費していた。また、それぞれの処理時間は復帰に 2ms 弱、処理に 10ms 程度であったことが読み取れる。この波形の csv から消費電流、電源電圧、時間の積で消費エネルギーを計算した結果、焦電センサの読み込み 1 回当たりに必要なエネルギーは約 1.4mJ であった。

3.2 通信と表示処理

バス停アプリケーションの通信・表示処理の消費電流を測定した。通信モジュールと電子ペーパーの処理の流れをそれぞれ図 9 と図 10 に記す。通信モジュールは初めにネットワークに参加する処理を行い、その後リクエストを送信

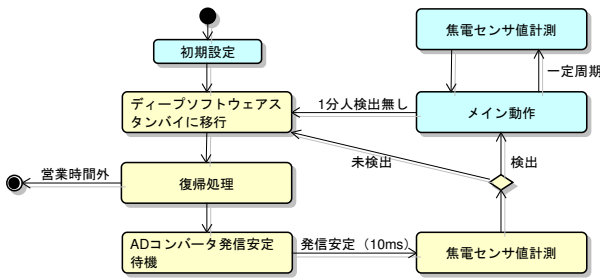


図7 人検出機能プログラム動作
 Figure 7 Activity of human detection

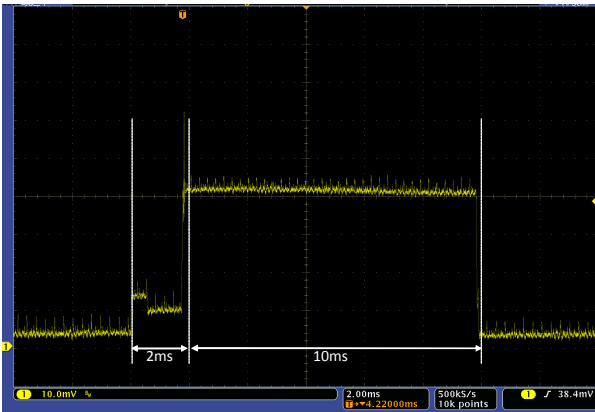


図8 センサ値読み込み1回当たりのCPU消費電流計
 Figure 8 CPU consumption current of once sensor reading

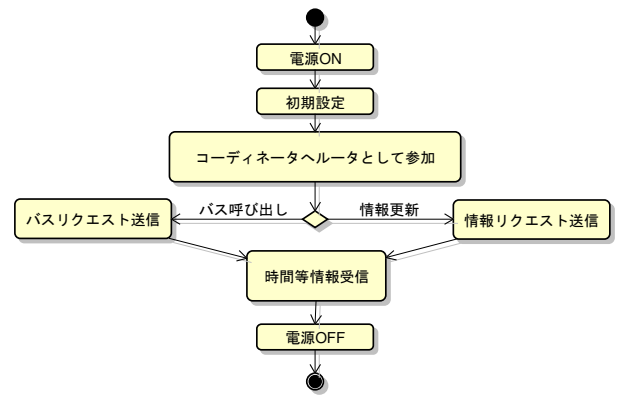


図9 無線モジュールの動作
 Figure 9 Activity of wireless module

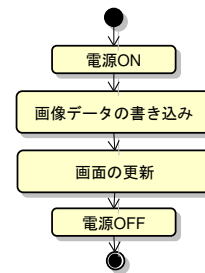


図10 電子ペーパーの動作
 Figure 10 Activity of electronic paper

する。リクエストにはバスの呼び出しを行うものと情報を受け取るだけの2種類あるが、処理の内容はほぼ変わらないため電量測定において差別化は行わなかった。電子ペーパーは画像データの書き込みと画面の更新で2つの処理を行う。

実験の結果、全体の処理時間は8秒強で、通信に5秒程度、電子ペーパーの更新に3秒程度であった。通信時の5秒はほぼネットワークへの参加にかかる時間であり、一度繋がった後の送受信処理は1秒未満であった。電子ペーパーにかかった処理時間は、画像データの書き込み1秒、画面の更新に2秒程度であった。計測した消費電流の波形をCPU、無線モジュール、電子ペーパーに分けそれぞれ図11、図12、図13に記す。それぞれ波形のcsvから消費電流、電源電圧、時間の積で消費エネルギーを計算した結果、通信と画面更新1度に消費するエネルギーはCPUで約1107mJ、通信モジュールで約636mJ、電子ペーパーで約264mJとなった。

4. 考察

各デバイスの消費電力計測実験より、人検出のための焦電センサ周期センシングには1回当たり1.4mJ程度、無線通信から電子ペーパーの更新までの一通りの処理1回当たりでは2006mJ程度のエネルギーを消費することがわかっ

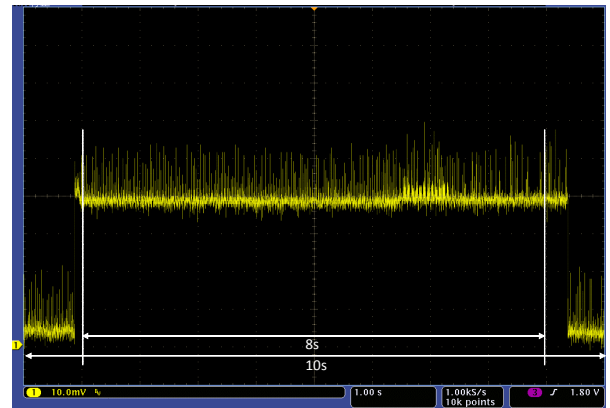


図11 CPU消費電流（通信と画面更新）
 Figure 11 CPU consumption current of Communication and display update

た。今回評価ボードの仕様上CPUがディープソフトウェアスタンバイモードに移行しても消費電流が落ち切らないため、そこについては評価の対象外とした。

前段階の実験で得た、七飯町アップル温泉での利用頻度のデータと、今回得られた実測値のデータを照らし合わせた消費エネルギーの見積もりを表5に記す。Cycleは焦電センサ周期読み込みの消費エネルギー、CPUは通信と表示

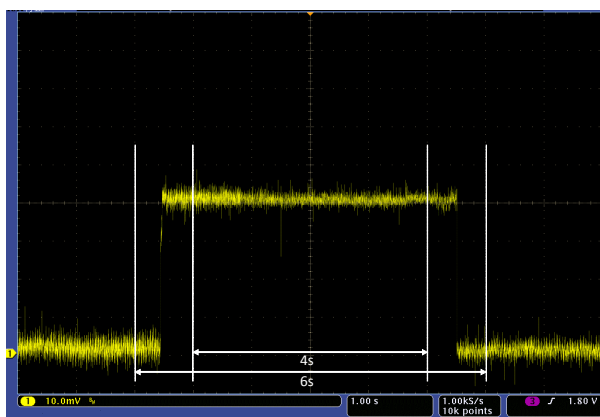


図 12 無線モジュールの消費電流

Figure 12 Consumption current of wireless module

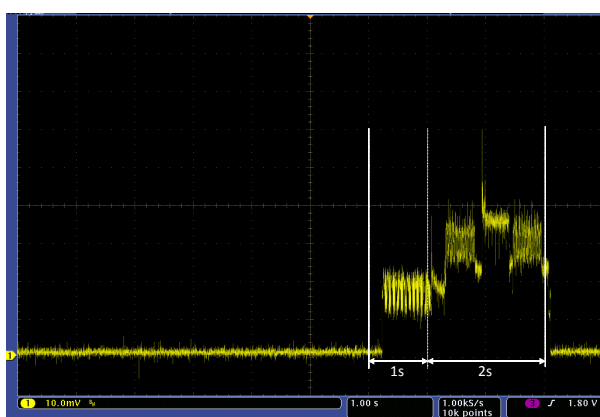


図 13 電子ペーパーの消費電流

Figure 13 Consumption current of electronic paper

の更新時に RX63N が消費したエネルギー、E-paper と Wireless はそれぞれ電子ペーパーと無線モジュールが消費したエネルギーを表す。1日当たりの稼働でバス停が消費するエネルギーは 640J 程度であり、1年間運用するためには 233630J (65Wh) 程度の電力量が必要になると予想できる。これは数 W の太陽光発電システムで十分にまかなえる数値であり、独立電源で数年間のメンテナンスフリーが実現可能な水準である。しかしながら、単 1 アルカリ電池 1 本の保有する電力量を 54000J 程度とすると 4~5 本分に相当し、使い捨て電池で数年間稼働させるには、改良の必要がある結果となった。

省電力性能改良の余地が大きい部分としては、焦電センサ周期計測時の CPU 動作時間削減が考えられる。今回は RX63N 内臓の AD コンバータの仕様上、ディープソフトウェアスタンバイモードから復帰後 10ms 待機する必要があった。待機以外の処理に必要な時間はこの 1 割にも満たないため、立ち上がりの速い AD コンバータの利用や、待機時に CPU をスリープさせる等の対策を行うことで、人検出に必要なエネルギーを大きく削減することが期待できる。

表 5 実測値からの消費電力量見積もり

Table 5 Estimate by the measured values

項目	1 処理 [J]	1 日[J]	年間消費[J]	年間消費[Wh]
Cycle	0.0014	111	40351	11
CPU	1.1067	292	106637	30
E-paper	0.2635	70	25392	7
Wireless	0.6356	168	61249	17
合計	-	640	233630	65

また、今回無線モジュールについて消費電流がカタログスペックより 10mA 近く大きかった。これは SPI 通信のクロックと信号のラインのプルアップ抵抗によるものと考えられる。本実験では RX63N と AD1321 の電源電圧が異なったためこのような設計となったが、電源電圧をそろえることで消費電流はカタログスペックに近づくと考えられる。その他にも、電子ペーパーに表示する画像の処理を考慮しなければ、RX63N よりもスペックが低く電力を消費しない CPU をメインで採用することも可能である。

5. まとめ

本稿では、北海道七飯町をモデルとして設計した、地方都市向けのオンデマンドバスシステムで利用するバス停のノーマリーオフによる省電力化を目指し、バス停の消費電力を評価した。バス停アプリケーションを実装し計測した各デバイスの実測値を、前実験で得たシステムの利用頻度に照らし合わせた。その結果、本研究で提案するバス停の消費電力量が、数 W の太陽光発電システムで数年間以上稼働させ続けることのできる水準であることを明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 鈴木 文彦: 地方におけるオンデマンド交通の可能性と課題, オペレーションズ・リサーチ 経営の科学 57(3), 124-129, 2012-03-01.
- 2) 大和裕幸, 准稗方和夫, 坪内孝太, 尾石航, 山中佑治, 柿沼徹也: 新しいオンデマンドバスシステムについて, 交通・物流部門大会講演論文集 2006(15), 149-152, 2006-12-13.
- 3) 安藤功兒: 不揮発性デバイス: ノーマリーオフコンピュータは実現できるか, 電子情報通信学会誌 93(11), 913-917, 2010.
- 4) Kento Nitta, Takeshi Nagasaki, Masashi Toda, Keiji Hirata, Hitoshi Matsubara: Applying Normally-off to the Demand Responsive Intelligent Bus Stop System, 2014 3rd IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2014), pp.163-166, 2014.
- 5) ルネサスエレクトロニクス株式会社: RX63N グループ, RX631 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編, 2013.
- 6) Embedded Pico Systems: Timing Controller Solutions for Pervasive Displays 4.41" and 7.4" Panels - Developer's Guide, 2013-08-09.
- 7) エー・アンド・デイ: AD-1321-1MW/10MW Wireless Module 取扱説明書, 2010.