

研 究 期 報

No. 104

平成 28 年 6 月

四 国 電 力 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研究期報 104号 目次

災害対策用可搬型無線通信システムの開発	1
Development of Portable Wireless Communication System for Disaster Response	
西条発電所周辺海域における付着生物の発生状況調査.....	11
Occurrence Survey of Sessile Organisms in the Sea Area around Saijo Power Plant	
近赤外光照射による青果物鮮度保持技術「iR フレッシュ」の開発	19
The development of the fruit and vegetables fresh-keeping technology "iR fresh" by the near infrared light irradiation	
太陽光発電の出力実績推定・予測システムの開発と実用化.....	27
Development and Practical Use of Estimation and Prediction System of PV.	
リチウムイオン電池加速劣化試験結果について	41
Result of the accelerated deterioration test of LIB	

災害対策用可搬型無線通信システムの開発

目 的

電力の安定供給を使命とする電力会社が、大規模災害で被災した電力設備を復旧させ早期に停電解消を図るには、被災状況の調査や復旧作業を的確に実施するための被災現場と災害対策本部とを結ぶ通信回線の確保が不可欠となる。

大規模災害では、既存の通信回線（自営通信網や公衆通信網など）が被災したり、停電により通信機器の利用が困難となる事態も想定されるため、大規模災害時に迅速かつ容易に臨時回線を構成できる災害対策用可搬型無線通信システムの研究を行った。

主な成果

1. システム設計

利用シーンや使用環境、現場要員の人数や技術レベルなどの諸条件からシステム要件を設定し、次のような特長を持ち、映像・音声・データなど様々な情報を容易に伝送できる災害対策用可搬型無線通信システムを設計した。

- ・ 4.9GHz 帯無線 LAN による安定した長距離伝送
- ・ 無線中継伝送機能により見通し区間以外でも通信可能
- ・ 位置情報を利用した簡単なアンテナ方向調整
- ・ 簡単にセットアップできるユニット構成
- ・ 屋外利用も可能な防水・防塵性能
- ・ 独立電源採用により長時間運転にも対応

2. フィールド試験

災害対策用可搬型無線通信システムのプロトタイプ機を開発し、長距離伝送試験や組立調整試験などの各種フィールド試験を行った結果、設定したシステム要件を満足することを確認した。

3. 現場意見の反映

現場技術者によるプロトタイプ機の試用・評価を実施し、機能や操作性が現場ニーズを満足できることを確認した。また、現場技術者の意見を参考に更なる改良を施してシステムの完成度を高めた結果、実用化の目途が得られた。

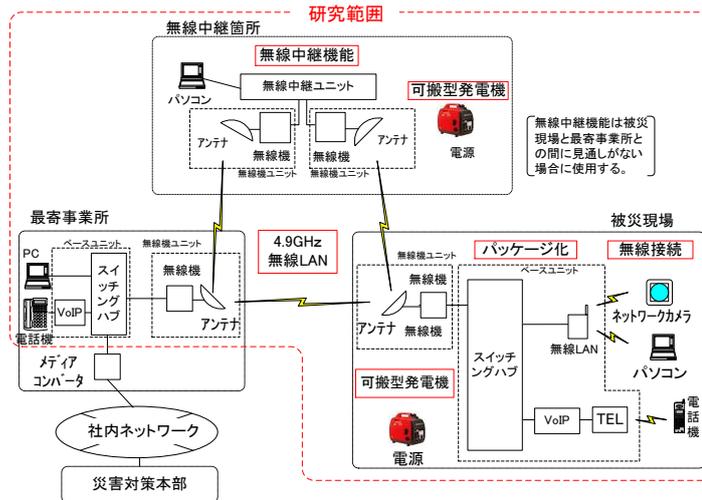


図1 システム構成

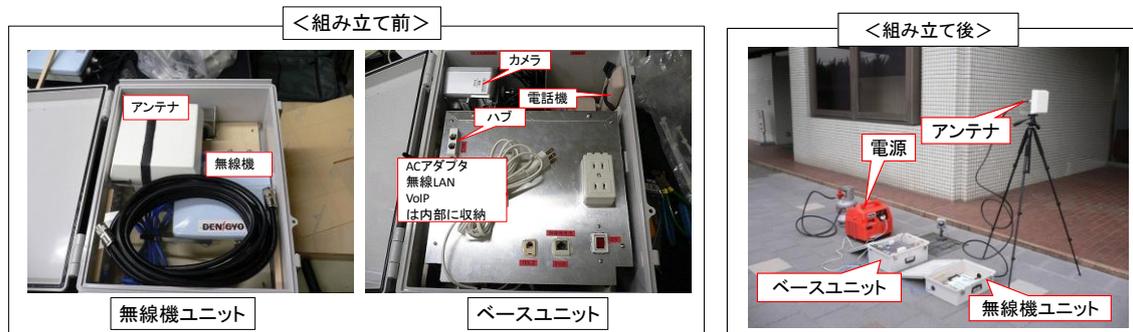


図2 プロトタイプ機の外観

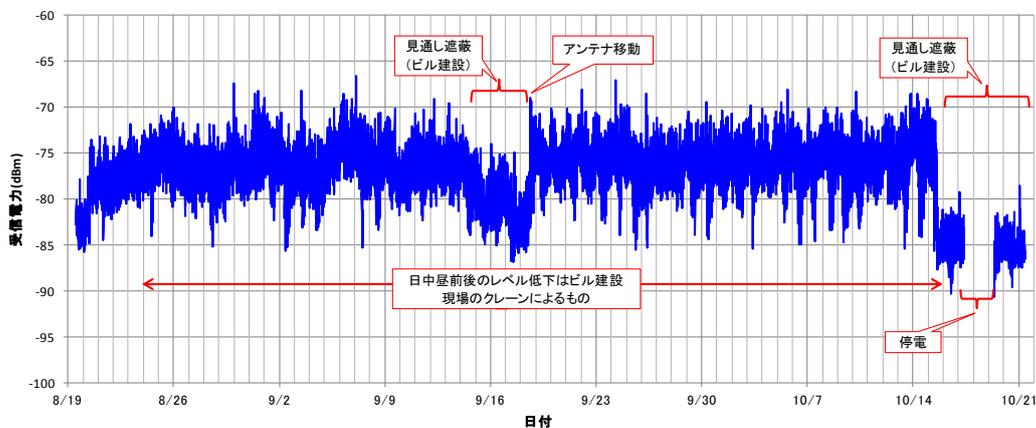


図3 連続運転試験結果 (受信電力)

研究担当者	阿部素久, 松木 一隆, 西村 浩一 (電子技術部)
キーワード	大規模災害, 臨時通信回線, 無線 LAN, 4.9GHz 帯, 独立電源, LP ガス発電機, IP 電話, ネットワークカメラ
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

西条発電所周辺海域における付着生物の発生状況調査

目 的

発電プラントでは海水を冷却水に用いるために海水取水設備に海生生物が付着すると取水流量の低下や復水器管の伝熱性能の低下が起こり、延いては発電効率の低下や発電負荷の制限につながる恐れがある。

近年、瀬戸内海に立地している四国電力(株)西条発電所海水系統で、ミドリイガイの付着が確認されている。そこで、西条発電所周辺海域においてミドリイガイ等の付着生物の発生及び付着時期等の調査を行った。

主な成果

今回の約 3 年間にわたる付着生物の発生及び付着状況等を調査した結果、西条発電所周辺では外来種であるミドリイガイは初夏から夏にかけて幼生が発生し少し遅れて付着が起こることがわかった。また、冬場の海水温の低下により死滅することも確認された。

ムラサキイガイは晩秋から冬にかけて幼生の発生が急増しているが、付着は少なかった。フジツボ類については通年を通して発生しており、8月をピークに夏場はかなり発生、付着することがわかった。



図1 海水取水設備への生物付着状況



図2 付着状況 (2015年11月)

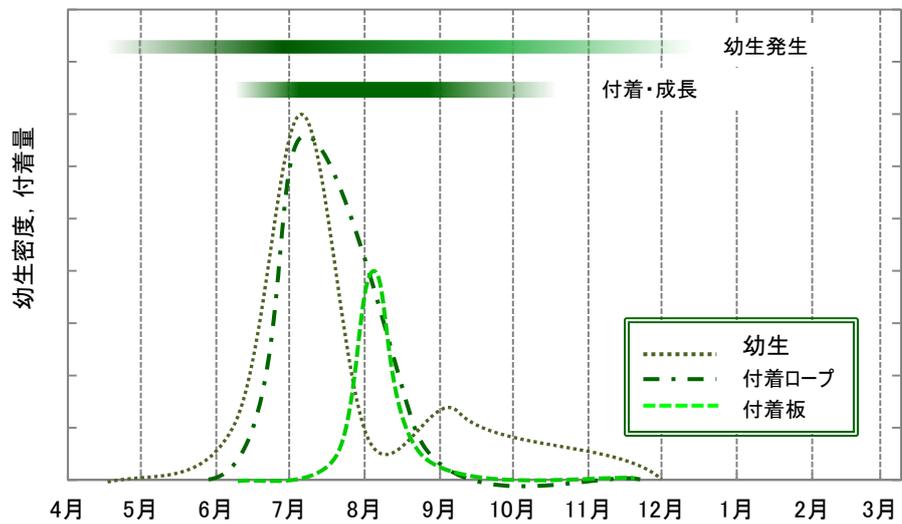


図3 ミドリイガイの生物付着カレンダー
(西条発電所周辺海域)

研究担当者	塩崎 景子, 柳原 哲 (化学バイオ技術部)
キーワード	冷却海水, 貝, ミドリイガイ, 生物付着カレンダー
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

近赤外光照射による青果物鮮度保持技術「iR フレッシュ」の開発

目 的

筆者らは収穫後の青果物に近赤外光を短時間照射することにより鮮度保持に効果があることを見出し「iR フレッシュ」と命名した。これに使用できる近赤外光照射装置を試作し、ホウレンソウ、ナス、イチゴを対象に鮮度保持効果を検証した。

主な成果

1. 照射装置の開発

光源として発光ダイオード（LED）を用いたタイプとレーザーを用いたタイプの二種類の照射装置を試作した。

LEDタイプは、(株)日本システムグループ（愛媛県西条市）と共同で開発した。この照射装置は、614mm×414mm のパネルに中心波長 850nm の砲弾型 LED を 3,290 個実装した面発光タイプであり、照射面で 300W/m² 以上の光出力が可能である。1 秒程度であり、収穫コンテナ単位で迅速なバッチ処理が可能であることから、手作業での出荷調整を行っている比較的小規模な生産現場に適している。また、大学や公設試験場での試験研究用とかレーザータイプでの試験に先立つ予備検討などにも適している。

一方レーザータイプは、レボックス(株)（神奈川県相模原市）が開発した中心波長 850nm の近赤外光を発する面発光型レーザー光源『フォトンラップ』を内蔵した実用型の照射装置を三井金属計測機工(株)（愛知県小牧市）が試作した（写真 1）。この装置では、レーザー光を光ファイバーからライトガイドを通して線状に照射することができ、照射面で 800W/m² 以上の光出力が可能である。本装置はベルトコンベアと連動させての連続処理が可能なインライン型であるため、青果物の共同選果場や集出荷場など比較的大規模な施設に適している。

2. 鮮度保持効果の評価

上記の照射装置のうちより実用性が高いと考えられるレーザータイプの照射装置を主に使用して、ホウレンソウ、ナス、イチゴを対象に鮮度保持効果を評価した。その結果、ホウレンソウでは萎び抑制、ナスでは果皮の艶維持や果実内部の種子変色の抑制、イチゴではかび抑制や果実硬度の維持などの効果が確

認できた（写真 2）。今回試作した照射装置を用いることでコンベアによる連続処理や 1 秒程度の短時間処理が可能となり実用性もあると考えられた。



写真 1 レーザータイプの照射装置

無照射



レーザー照射



写真 2 ホウレンソウでの萎れ抑制効果（6 日後）

研究担当者	石田 豊, 秦 亜矢子, 垣渕 和正 (化学バイオ技術部)
キーワード	青果物、野菜、果物、鮮度保持、日持ち延長、近赤外光、照射
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

太陽光発電の出力実績推定・予測システムの開発と実用化

目 的

太陽光発電（PV）は発電中に CO₂を排出しないクリーンなエネルギーとして注目されており、現在大量導入が推進されている。ところが、PV の出力は天候に依存することから、電力系統に大量に連系すると需給運用などに影響を及ぼすことが懸念されている。そこで、PV の出力を日々の需給運用における計画や制御に的確に組み込み、安定運用が図れるよう、PV の出力実績を推定すると共に将来の出力を予測するシステムを開発した。

主な成果

日射計測値と気象衛星ひまわりの雲画像を基に PV の出力実績をリアルタイムに把握する PV 出力実績推定手法、および気象庁の数値予報と気象衛星ひまわりの雲画像を基に将来の PV 出力を予測する PV 出力予測手法を開発した。本手法を適用した実運用システムを開発し、実績推定値および予測値は四国電力の中央給電指令所において需給運用等に活用している。

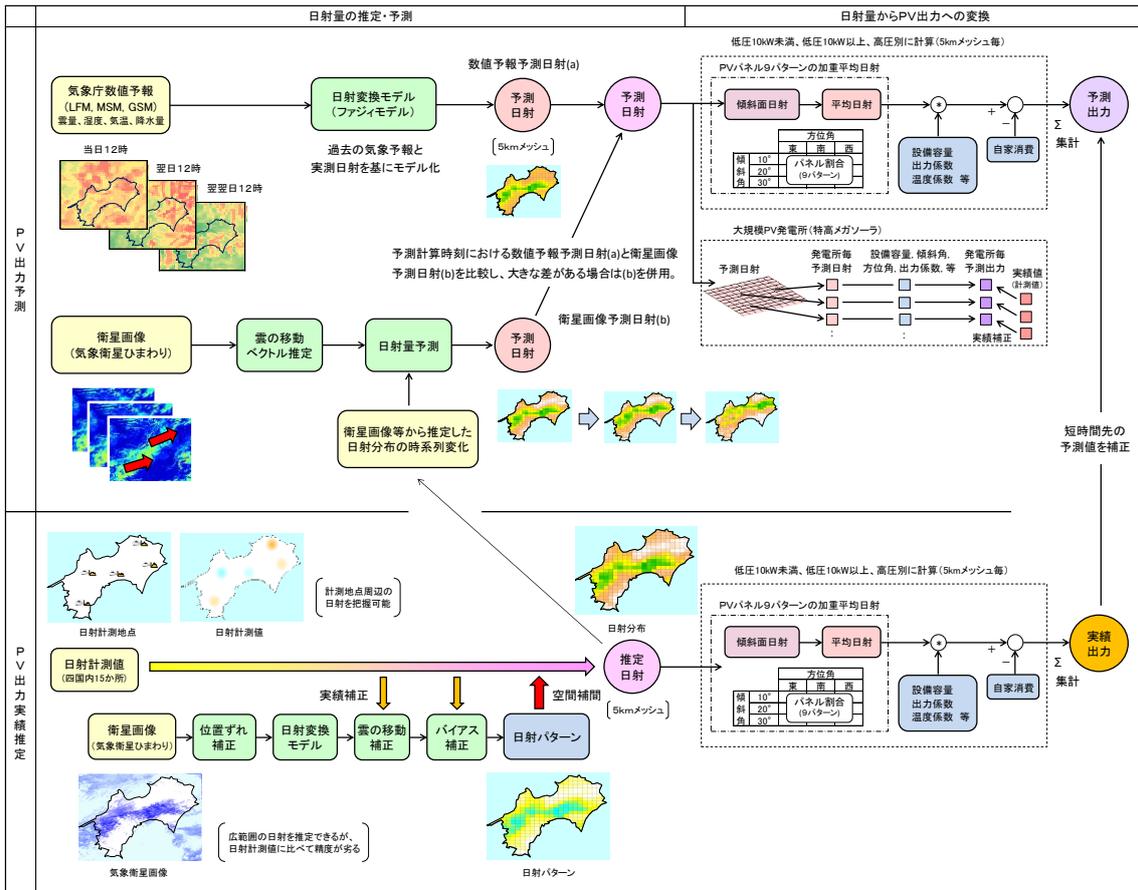


図1 太陽光発電の出力実績把握・出力予測手法の全体フロー

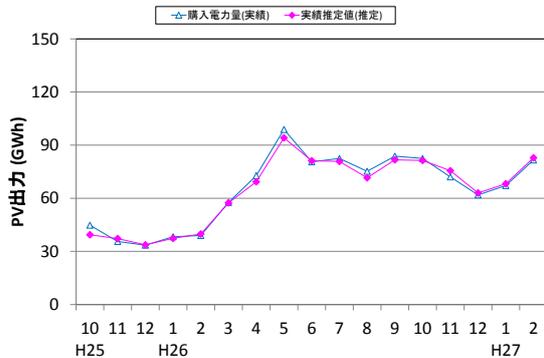


図2 出力実績推定精度

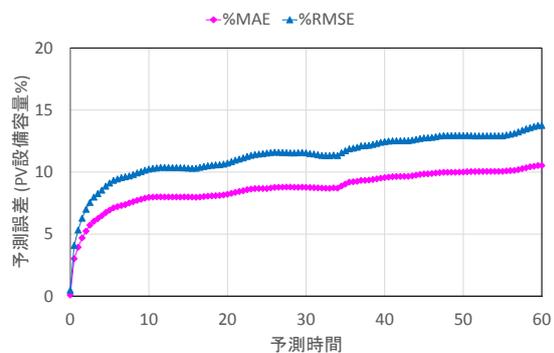


図3 出力予測精度(10~14時)

研究担当者	瀧川 喜義 (電力技術部)
キーワード	太陽光発電, 出力推定, 出力予測, 気象庁数値予報, 衛星雲画像
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

リチウムイオン電池加速劣化試験結果について

目 的

蓄電池は高価なため、運用に悪影響を及ぼさない範囲で極力寿命を長くする運用を行うことが望まれる。蓄電池の実運用において、寿命に影響を与える項目として下記が考えられる。

- ・蓄電池周囲温度
- ・蓄電池充電深度（運用SOC範囲）
- ・充放電電流の大きさ・変動

今回の研究においては、加速劣化試験により充電深度、充放電電流の大きさ・変動に関して評価を行った。

主な成果

1. 蓄電池寿命への影響

蓄電池の実運用において、蓄電池充電深度（運用SOC範囲）が寿命に大きな影響を与える。充放電電流の大きさ・変動は影響を与えない。

2. 経年時の温度特性

経年化したリチウムイオン電池では、低温時の特性劣化が著しく、特に内部抵抗の増加が著しい。一方で、高温時の特性劣化は比較的少ない。高温時の寿命消費を防止するために冷房が必要であるが、あわせて経年化した蓄電池では、低温時の特性劣化を補償するための暖房が必要と考えられる。

3. 最適な充電深度の存在

充電深度を浅くすると寿命は長くなるが蓄電池コストは高価になるため、経済的に最適な充電深度が存在する。ただし、今回の実験では最適な充電深度は求められなかった。

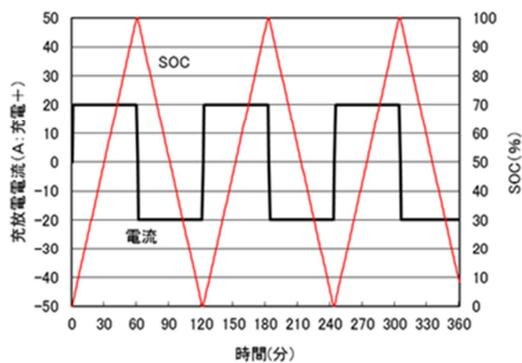


図-1 ケース1 (充放電深度大) 充放電パターン

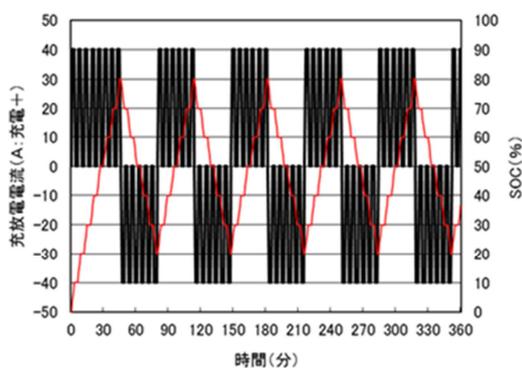


図-2 ケース2 (電流・電流変動大) 充放電パターン

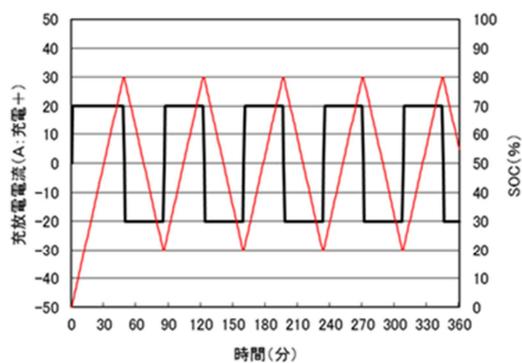


図-3 ケース3 (基準) 充放電パターン

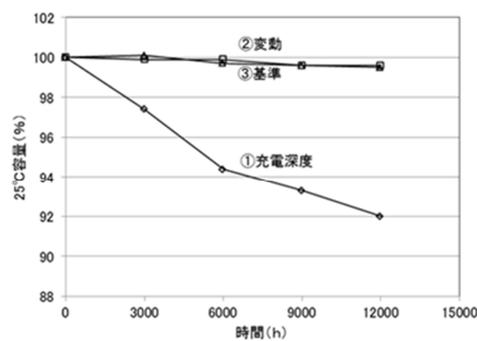


図-4 25°C放電容量の変化

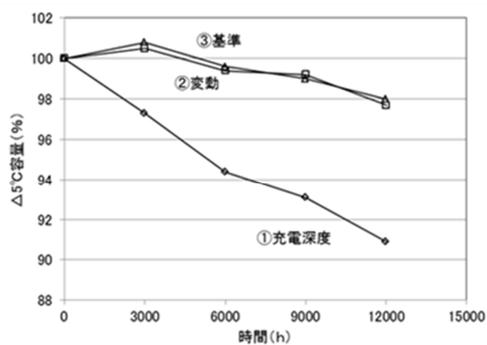


図-5 -5°C放電容量の変化

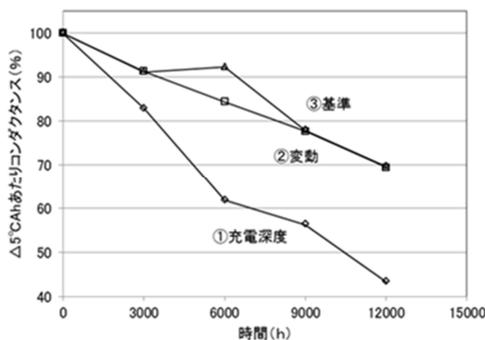


図-6 -5°C単位容量あたりコンダクタンス値の変化

研究担当者	多田安伸 (産業応用技術部)
キーワード	リチウムイオン電池, 加速劣化試験, SOC, 放電容量, 内部抵抗
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

災害対策用可搬型無線通信システムの開発

(株)四国総合研究所 電子技術部 阿部 素久
(株)四国総合研究所 電子技術部 松木 一隆
(株)四国総合研究所 電子技術部 西村 浩一

キーワード： 大規模災害
臨時通信回線
無線 LAN
4.9GHz 帯
独立電源

Key Words : large-scale disaster
Emergency communication line
Wireless LAN
4.9 GHz band
Independent power source

Development of Portable Wireless Communication System for Disaster Response

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Dept.
Motohisa Abe, Kazutaka Matsugi and Koichi Nishimura

Abstract

We have studied a portable wireless communication system in order to build temporary radio communication lines easily and quickly if regular communication lines were damaged by large-scale disasters. It is very important to recover any communication methods between the emergency response headquarters and the disaster affected areas as soon as possible.

At first, we have defined these three system requirements. (1) over-the-horizon and long-distance wireless communication, (2) quick and simple installation and (3) independent power source that has features of easy handling and long time duration, based on deliberate studies about various limitation conditions such as the usage scenes and the use environment of the system.

Secondly, we have designed the system architecture to satisfy these three system requirements and have developed a prototype system. We have successfully realized stable long distance transmission by adopting 4.9GHz band wireless LAN as a wireless communication system, and communication outside prospect by wireless relay function.

In addition, we have improved environmental durability and field workability by putting the whole modules in a waterproofed and dust-proofed plastic box. The system is designed that can be operated by individual electric power source using the LP gas generator. The LP gas generator has some good features for emergency usage, for example easy fuel handling and long time continuous operability.

We have performed a field test using the prototype and confirmed that system is enough practicable in the use scene that we assumed at the beginning.

Furthermore, we have improved the system's integrity based on evaluation results by the field engineers in charge of real field operation.

1. はじめに

暮らしや産業に欠かせない電力の安定供給を使命とする電力会社は、大規模災害等で電力設備が被災して停電が発生した場合に、速やかに被災状況を把握し、必要かつ可能な部分から設備復旧を行い、早期に停電解消を図る必要がある。

こうした電力設備等の被災状況を調査し復旧作業を的確に実施するには、被災現場と災害対策本部を結ぶ通信回線の確保が不可欠となる。

本研究の目的は、大規模災害等のような不測の非常事態でも迅速かつ簡便に臨時回線を構成できる災害対策用可搬型無線通信システム（以降、「災害用無線システム」という）を開発することである。（図1）

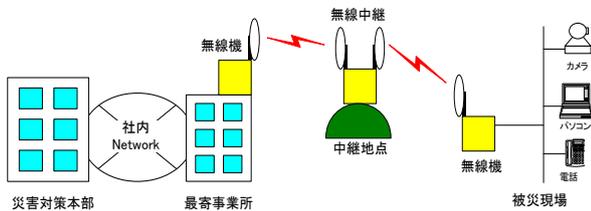


図1 災害用無線システムの利用イメージ

本研究では、まず、大規模災害時の利用シーンや使用環境などの制約条件を検討・抽出するとともに、現場技術者にアンケート調査を行い、災害用無線システムに必要な要件を設定した。

次に、これらの要件を満足させるために、4.9GHz帯無線LAN技術等を用いて映像・音声・データなど様々な情報を容易に伝送できる災害用無線システムを設計し、プロトタイプ機を開発した。

そして、プロトタイプ機を用いた各種フィールド試験を行って評価した結果、当初想定したような利用シーンに十分適用可能であるとの結論を得た。

さらに、プロトタイプ機に対する現場技術者の評価意見を参考にさらに改良を加えるなどしてシステムの完成度を高めた結果、実用化の目途が得られた。

本稿では、災害用無線システムの開発について報告する。

2. システム要件の検討

災害用無線システムの要件について検討した。

2.1 被災状況の想定

四国地方をはじめ西日本で広域な被害を及ぼすと考えられる南海トラフ巨大地震の発生リスクが高まっている。万一発生すれば、地震動そのものによる被害のほか、巨大津波による甚大な被害が広範囲に発生すると考えられている。

本研究では、大規模災害時の被災状況を東日本大震災を参考に、電力、通信、交通、物資、要員、環境の各項目に分けて想定した。（表1）

表1 被災状況の想定

項目	被災状況
電力	長時間停電が発生し、商用電源は使えない。
通信	広範囲に自営通信網が被災し通信不能になる。また、通信事業者の通信サービス（公衆通信網）も長期間使用できない。
交通	各地で道路が寸断され、車での移動が困難、または長時間を要することとなる。
物資	交通網の混乱により、物資の補給が滞る。
要員	少人数での対応（1個所2～3人程度）を余儀なくされる。また、熟練者以外で対応しなければいけないケースも発生する。
環境	粉塵や臭いなど劣悪な環境となる。

表1のように大規模災害時では、既存通信回線（自営通信網や公衆通信網など）が被災して使えなくなったり、停電により通信機器の利用が困難となることが想定される。

また、道路等の交通施設が被害を受けて通行止めとなり、機材の運搬ができなくなったり、応援要員を派遣することが容易にできず過酷な現場の作業を少人数で対応せざるを得なくなることも想定される。

災害用無線システムにはこうした制約条件への対応が求められる。

2.2 利用シーンの想定

2.1で想定した被災状況を前提に、次のような4つの利用シーンを想定した。

① 設備の被災状況調査時の連絡

大規模災害発生直後に被災現場に入り、その被災状況を災害対策本部に、映像や音声を使ってリアルタイムに連絡する。

② 復旧作業に必要な臨時連絡回線

被災現場と災害対策本部の間で、復旧作業に必要な情報（映像や音声等）を伝送し情報共有する。

③ 被災現場および周辺の監視

被災現場やその周辺の状況あるいは危険箇所（地すべり、土砂ダム等）を映像で遠隔監視する。

④ 被災現場のテレコン回線仮復旧

被災した電力設備の遠方監視制御（テレコン）回線を仮復旧させる。

2.3 災害用無線システムに対する要望

実務経験等から培った豊富な知識やノウハウを災害用通信システムの開発に活かすため、現場技術者を対象にアンケート調査を実施して、次のような項目に対する要望等を収集した。

- ①機材の運搬／設置／組立て
- ②システムの操作性
- ③無線伝送距離／無線伝送容量
- ④無線通信の安定性
- ⑤システムの耐久性、耐環境性
- ⑥必要な周辺機器（カメラ、パソコンなど）
- ⑦その他（システムへの要望）

得られた回答内容を分析して文意を代表的な表現に集約・整理した結果が図2である。

「小型・軽量化」「耐環境性」と操作性に関する「簡単操作」「簡単組立て」の4項目で全体の60%を占めており、これらの性能が強く求められることが分かった。

また、停電時や屋外でも利用できるように「簡易電源」への要望があったほか、通信性能に関しては「見通し外通信」や「通信安定性」の要望が複数あった。

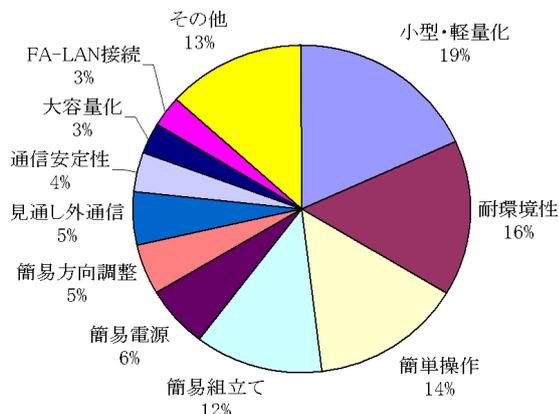


図2 災害用無線システムに対する要望

2.4 システム要件

被災状況や利用シーンの想定、災害用無線システムに対する要望を踏まえ、システム要件として下記の3項目を設定した。

- ① 安定した長距離無線伝送が可能で、見通し外でも通信ができること
- ② 迅速かつ簡単に組立て・調整ができること
- ③ 取扱いが容易な独立電源を利用できること

3. システム設計とプロトタイプ機の開発

3.1 システム要件への対応

災害時に使用する通信システムの製品化動向や無線技術の調査等をもとに検討を行い、表2のようにシステム要件への対応を図ることとした。

安定した長距離無線伝送に関しては、4.9GHz帯無線LANを採用する。これは、電波環境などから安定した長距離伝送が期待できると考えたためである。

見通し外通信に関しては、無線中継機能を装備することで可能にする。

組立て・調整の簡単化に関しては、システムのパッケージ化や位置情報を活用したアンテナ調整方法等の工夫で実現する。

また、取扱いが容易な独立電源には、LP ガスを燃料とする可搬型発電機を採用する。

表2 システム要件への対応策

システム要件	対応策
安定した長距離無線伝送	・4.9GHz帯無線LAN
見通し外通信	・無線中継機能
組立て・調整の簡単化	・システムのパッケージ化 ・小型のパッチアンテナ ・位置情報を活用したアンテナ調整 ・ネットワークカメラ、パソコン等の無線接続、電話機コードレス化
取扱いが容易な独立電源	・可搬型発電機

3.2 システム構成

今回開発する災害用無線システムは、図3に示すように、被災現場と最寄事業所との間に適用し、

さらに、最寄事業所と災害対策本部との間は既存ネットワークを活用して通信回線を構成する。

また、被災現場で使用する主なアプリケーションは、音声通話、映像およびデータ通信であり、標準装備する通信端末は電話、ネットワークカメラおよびパソコンである。なお、最寄事業所側で既設ネットワークと接続するためのポートを災害用無線システムに用意している。

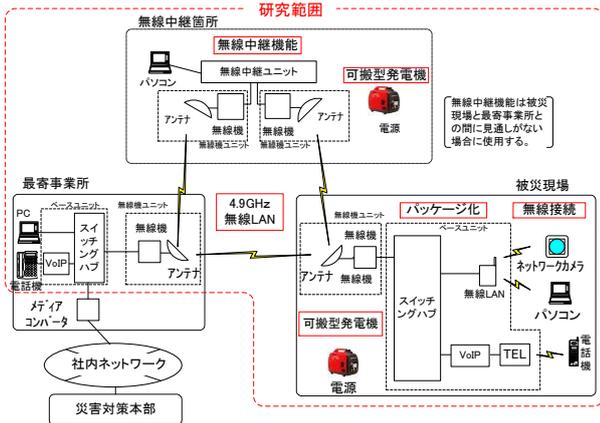


図3 災害用無線システムの構成

(1) 4.9GHz 帯無線 LAN

被災現場と最寄事業所との間の無線通信には、4.9GHz 帯無線 LAN（無線規格:IEEE802.11j）を採用した。これは、4.9GHz 帯無線 LAN を使用するには無線局登録が必要になるが、ISM バンドを使う 2.4GHz 帯無線 LAN に比べて利用者の集中が少なく電波環境がクリーンで、大規模災害時でも安定した長距離通信が期待できるためである。

また、4.9GHz 帯無線 LAN の場合、小型パッチアンテナ（W174mm×D174mm×H43mm）で数十 km の長距離伝送が可能になるうえ、アンテナの取扱いが簡単になり方向調整等も容易になる。

(2) 無線中継機能

4.9GHz 帯無線 LAN では、電波の直線性が強く基本的に通信する 2 地点間が見通しになれば通信ができない。そこで、災害用無線システムでは、被災現場と最寄事業所が直接見通せない場合でも、2 地点を見通すことができる場所に中継機能を設置することで通信を可能にした。

この機能を利用することで、災害用無線システムの適用場所が大幅に広がり、また、中継箇所を複数設けることで、伝送距離を伸ばすことも可能

になった。

(3) システムのパッケージ化

災害用無線システムでは、運搬などの利便性（小型・軽量化）や操作性（簡単操作、簡易組立て）を考慮して、「無線機ユニット」と「ベースユニット」の 2 つに分けた。

無線機ユニットは、無線機、アンテナ、同軸ケーブル、LAN ケーブル等からなる。

ベースユニットは、無線機電源アダプタのほか、ネットワークカメラや電話機、パソコン等の通信端末を接続するポートからなり、フロントパネルに LAN ポート、無線機ポートなどを配置した。また、収容するネットワークカメラや電話機、パソコンなどの通信端末には、広く普及している無線標準規格(2.4GHz 帯無線 LAN および 1.9GHz DECT 方式)の機器を用いて無線接続させ、現場での配線を不要にした。なお、無線中継地点におくベースユニット（中継ユニット）は、無線機ユニット 2 台を接続できる仕様とした。

各ユニット毎の構成機器は配線済とし、屋外利用を前提に防水・防塵のプラスチックボックス（W350mm×D450mm×H200mm 以下）に収容した。各ユニットは、収容機器を含めて 7kg 程度の重さであり、一人でも容易に持ち運び可能である。

組立時に必要な配線箇所は、わずか 2 か所（アンテナ～無線機ユニット間および無線機ユニット～ベースユニット間）であり、一人でも短時間で容易に組立て可能である。また、無線機ユニットとベースユニットとの間は PoE（Power over Ethernet）対応で、1 本の LAN ケーブルでデータ送受信と電源供給を行う。

以上のように、パッケージ化の工夫を行って、現場での配線作業の省力化を図った。

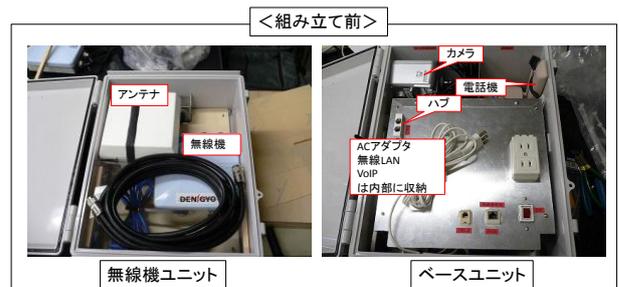


図4 プロトタイプ機の外観（組立て前）



図5 プロトタイプ機の外観（組立て後）

3.3 位置情報を活用したアンテナ調整

4.9GHz帯無線LANは電波の直線性が強いことから、10kmを超えるような長距離通信を行う際には、アンテナ方向を定めるために微妙な調整が必要になる。さらに、悪天候等によって対向局の方向が視認できないようなケースも想定される。こうしたアンテナ方向調整を素早く適切に行うためには、調整方法に習熟する必要がある。

そこで、未経験者でもアンテナ方向調整が素早く正確にできるよう、位置情報をもとにアンテナ方向を計算するソフトウェア（アンテナ調整サポートアプリ）を開発した。

すなわち、自局および相手局の位置情報をもとに、アンテナ調整サポートアプリで相手局の方向を求め、方位指示器を使ってアンテナを指定する方向に正確に向けることができるようにした。

(1) アンテナ調整サポートアプリ

アンテナ方向調整を容易に実現するために、自局および相手局の位置情報（緯度、経度、高度）から相手局の方向を求めるソフトウェア（アンテナ調整サポートアプリ）を開発した。

このソフトウェアはjavaで開発してあるので、一般的なWindowsパソコンであれば動作可能である。

図6はアンテナ調整サポートアプリの画面であり、入力した自局と相手局の位置情報もとに相手局の方向を計算して数値とグラフィックで表示する。

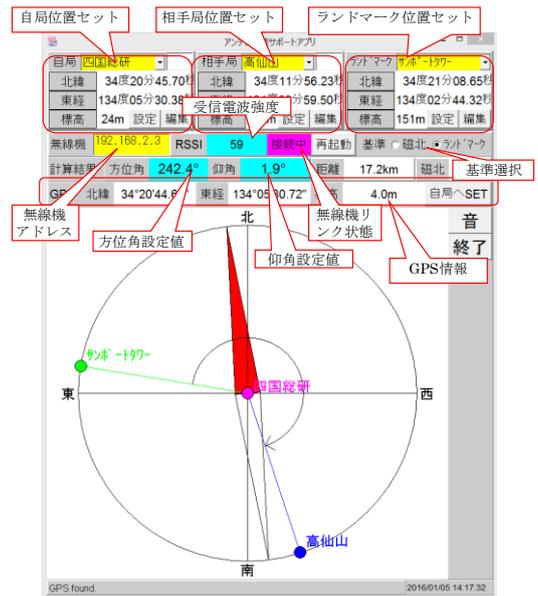


図6 アンテナ調整サポートアプリの画面

アンテナ調整サポートアプリでは、事業所の位置情報入力の負担軽減のため、既知の事業所等の位置情報を事前登録しておき、プルダウンメニューから選択できるようにした。

なお、GPSセンサー搭載パソコンであれば、自局の位置情報を自動入力することも可能であるが、GPSセンサー未搭載パソコンであれば、NMEAフォーマット対応ハンディGPSを接続することで位置情報を自動入力させることできる。

この他、このアンテナ調整サポートアプリには、4.9GHz帯無線LANの受信信号強度（RSSI）を画面表示する機能や、その大きさを音の違い（音量と周波数の大小）として出力する機能も設けた。この機能を使えば、音で電波状態を確認しながらアンテナ方向の微調整を行うことも可能である。

(2) 方位指示器

方位指示器は、方位磁石および傾斜計をアンテナ取付金具と一体化させたもの（図7）で、指定する方向にアンテナを正確に向けるための器具である。なお、アンテナ取付金具が方位磁石に悪影響を及ぼすことのないよう、アンテナ取付金具の材質はアルミニウムとした。

アンテナ調整サポートアプリで求めた結果をもとに、アンテナに連動させた方位指示器の方位と仰角を合わせれば、相手局の方向にアンテナを正確に向けることができる。

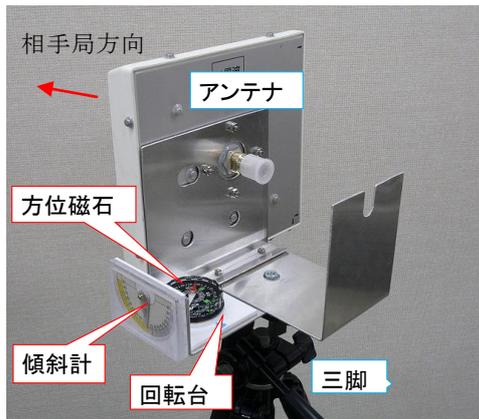


図7 方位指示器

3.4 可搬型発電機

大規模災害時には停電が発生する可能性が高く、災害用無線システムを有効に機能させるには、独立電源の用意が不可欠である。

このための独立電源として、LP ガスを燃料とする可搬型発電機を選択した。

可搬型発電機は、燃料容量に応じた電源供給時間の制限があるものの、燃料を補給することで稼働時間をのばせることが利点である。

一般的に可搬型発電機としては、ガソリンあるいはLP ガス（液化石油ガス）を燃料とするものが普及しており、さらにLP ガス対応機には、液化プロパンガス（家庭用プロパンガス）と液化ブタンガス（カセットガスボンベ）の2つの種類がある。

このうち、ガソリンは引火点が低く取扱いに注意を要すること、また長期の燃料保管には不向きで、常時稼働を前提としない災害用無線システム用としてはメンテナンス負担への懸念がある。

また、燃料の取扱いが比較的簡単なLP ガスのうち、カセットガスボンベ対応機は、燃料容器がコンパクトで持ち運びが容易な反面、電源供給時間が短いことや低温環境で使用できない（燃料のブタンが低温で気化しない）等の短所がある。一方の家庭用プロパンガス対応機は、5kg ガスボンベで連続 20 時間程度の電源供給が可能であり、低温環境でも使用可能である。

以上のようなことから、災害用無線システムのための独立電源には、家庭用プロパンガスを使用する可搬型発電機を採用した。

4. フィールド試験

災害用無線システムとしての性能を評価するため、プロトタイプ機を用いて表3に示した各種のフィールド試験を実施した。

表3 フィールド試験項目と主な評価内容

試験項目	主な評価内容
長距離伝送試験	通信性能の距離特性
無線中継試験	無線中継伝送時のアプリケーション動作
システムの連続運転時間	長期のシステム動作安定性・降雨の影響
テレコン伝送試験	テレコン信号伝送性能
組み立て調整試験	組み立て調整にかかる時間
電源連続供給試験	電源の連続供給時間

4.1 長距離伝送試験

災害用無線システムの通信性能の距離特性を評価するため長距離伝送試験を実施した。

試験は、香川県の三木町郊外の山頂と高松市および三木町平野部の11個所（距離=4.8~23.8km）の間で通信し、受信電力、通信速度、遅延時間およびアプリケーション動作を調査した。

これら試験の結果から、少なくとも約24kmまでは安定した通信が可能であることを確認した。

(1) 受信電力

図8に示したように、伝送距離が長くなるに従って受信電力は小さくなった。

受信電力と伝送距離の対数近似式は、式(1)のようになり伝送距離に対して3.51乗で減衰した。

$$P = -10 \log(d^{3.51}) - 46.22 \quad (1)$$

但し、 P : 受信電力(dBm) , d : 伝送距離(km)

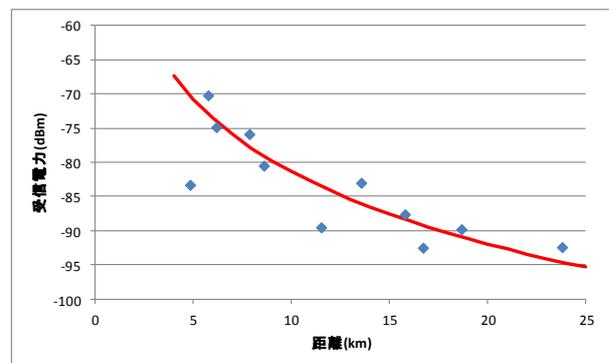


図8 伝送距離と受信電力の関係

(2) 通信速度

通信速度は iperf により測定した。伝送距離と通信速度の関係は、図 9 に示したように、通信速度が伝送距離に比例して遅くなり、TCP で約 2~6Mbps、UDP で約 4~18Mbps であった。

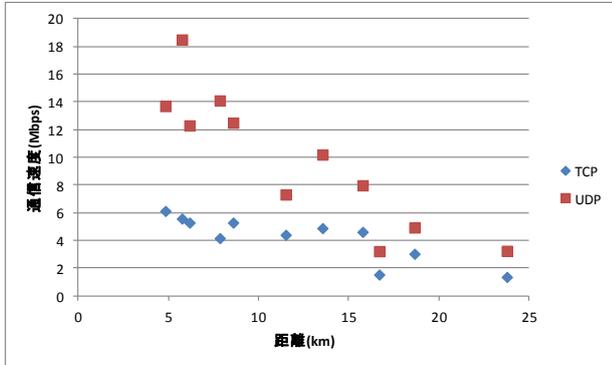


図 9 伝送距離と通信速度の関係

(3) 遅延時間

遅延時間は ping コマンドにより測定した。遅延時間は約 4~5ms で、伝送距離が長くなるにつれてわずかに大きくなった。これは、伝送距離が長くなると伝送速度が低下し、パケット伝送時間が長くなったことが原因である。

(4) アプリケーション動作状況

すべての測定場所で、電話は正常に動作したが、ネットワークカメラは長距離区間でフレーム落ちが発生した。これは、長距離区間で映像のリアルタイム伝送に必要な通信速度が得られなかったためである。ただ、被災現場で映像がスムーズに伝送できない場合でも、被災状況を迅速に確認できることがより重要と考えられ、長距離伝送でも映像伝送の活用は有効と言える。

4.2 無線中継試験

無線中継伝送時におけるアプリケーション動作状況を評価するため無線中継試験を実施した。

図 10 に示したように、香川県高松市沿岸の島（女木島）を無線中継箇所とし、対向局の一方を高松市三谷町の小高いため池（三郎池）の堤上におき、他方を高松市西方の市境にある台地（五色台）山頂においた。（合計距離 25.4km（14.1km + 11.3km））これらの中で通信回線を構成し、受信電力、通信速度、遅延時間およびアプリケーション動作状況を調査した



図 10 無線中継試験場所

図 11 は女木島（高松市）での無線中継試験の様子である。

試験した結果、通信速度は UDP が約 5Mbps、TCP が約 1Mbps であり、遅延時間はトータルで約 9.7ms であった。中継処理による遅延時間の増加は約 1.3ms であった。電話の通話試験では、通話音声に若干ノイズはのっていたが、会話に支障ないレベル（5 段階評価の「3（普通）」）であった。また、映像試験では、五色台側（最寄事業所側を想定）から確認した三郎池側（被災現場側を想定）のカメラ映像に問題はなく良好であった。



図 11 無線中継試験状況（女木島）

4.3 連続運転試験

災害用無線システムの長期の動作安定性および降雨による影響を調査するため、連続運転試験を実施した。

図 12 に示すように、四国総合研究所ビル屋上と 5.7km 離れたビルの屋上に無線機を設置して 2 ヶ月間(H27/8/19-10/21)連続運転をさせた。その間、5 分毎に受信電力、通信速度、遅延時間を自動測

定し記録した。また、試験期間中の雨量や無線機を収容するプラスチックボックス内の温度も合わせて測定・記録した。

なお、試験期間中に機器故障や異常が発生したことをすぐ把握できるように、図 13 のように遠隔監視システムを構築し、機器に異常が発生すれば、直ちに電子メール通知が届くようにした。

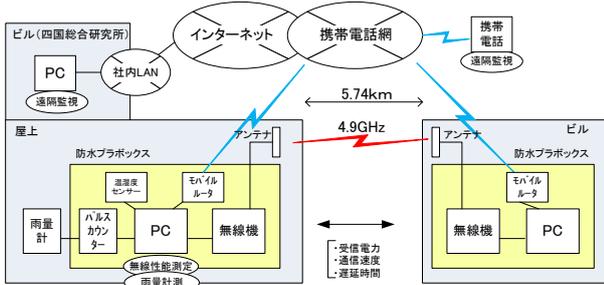


図 12 連続運転試験構成

図 13 に示すように、現地では強風対策として、試験機器を L アンクルで作成したベースに取り付け、コンクリートブロックなどで固定した。



図 13 連続運転試験状況

図 14 は受信電力測定結果である。電波経路途中のビル建設工事や、試験機器の電源供給元の停電（商用停電）発生などの偶発的な外的要因の影響（9/14-9/18 および 10/15-10/21 の全体的なレベル低下および日中の一時的なレベル低下）は受けたものの、それらを除けばシステムの受信電力は 2 ヶ月間通して $-85 \sim -70\text{dBm}$ を維持しており、システムの長期動作安定性を確認できた。

図 15 は通信速度の測定結果である。通信速度は受信電力とほぼ連動して変化し、TCP は $4 \sim 7\text{Mbps}$ 、UDP は $10 \sim 15\text{Mbps}$ の範囲を変動した。

図 16 は降雨強度の測定結果である。試験期間中に降雨があったのは 19 日間で、その中には最大降雨強度が 27.4mm/h の日もあったが、降雨に

よる受信電波強度の変動は確認できなかった。

5 GHz 帯電波の降雨減衰量は、 60 mm/h 程度の非常に激しい雨でも 0.2dB/km 程度と考えられるため、降雨による通信品質への影響はほとんどないと言える。

図 17 は、無線機を収容したプラスチックボックス内温度を外気温と比較測定した結果である。ボックス内温度が 40°C を超えたのは、2 カ月の測定期間の中で 3 日間あったが、温度上昇による無線機等の不具合は発生しなかった。

なお、詳細分析した結果、晴天日のボックス内温度の最大値は外気温の最大値を約 10°C 上回る傾向があることが分かった。

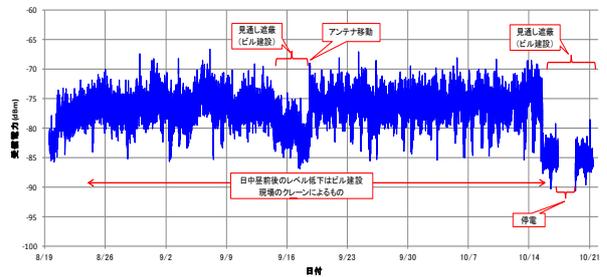


図 14 連続運転試験結果（受信電力）

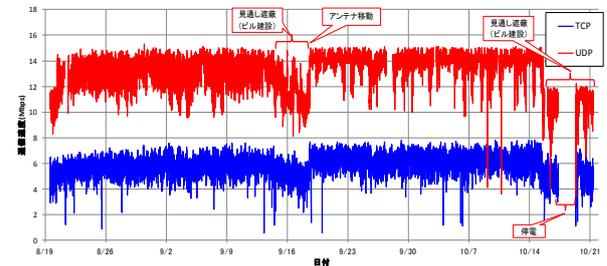


図 15 連続運転試験結果（通信速度）

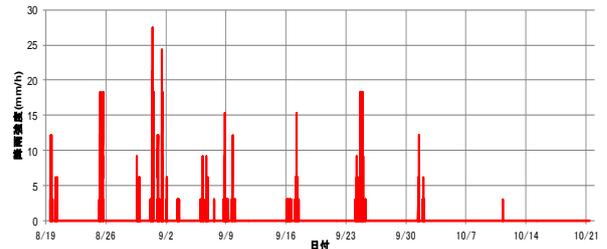


図 16 連続運転試験結果（降雨強度）

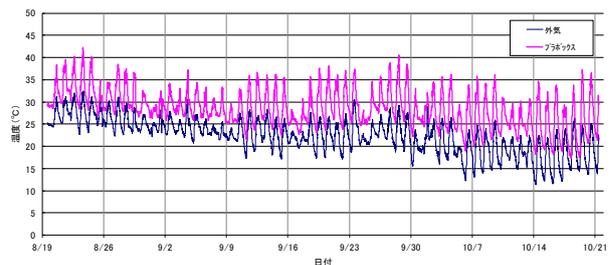


図 17 外気温とボックス内温度の測定結果

4.4 テレコン伝送試験

テレコン伝送試験では、災害用無線システムを電力設備の遠方監視制御（テレコン）信号の中継回線として使用する場合の伝送性能を評価した。

図 18 に示すテレコン伝送試験のシステム構成のように、訓練設備を使って試験を実施した。

また、2種類（サイクリック方式、HDLC方式）あるテレコン信号を IP パケットに変換して災害用無線システムで中継伝送するために、サイクリック方式では音声 IP 化装置、HDLC方式では HDLC-TC・IP 化装置を用いた。

無線伝送路は、訓練設備の設置個所近辺で無線中継して折り返して構成した。また、アンテナ前面に金属板を置き、アンテナ遮蔽率を変えて信号強度を調整することで長距離伝送を模擬した。

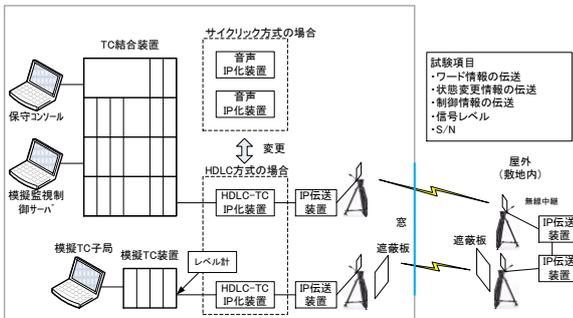


図 18 テレコン伝送試験のシステム構成

試験の結果、災害用無線システムを使ってテレコン信号を中継伝送可能であることが分かった。

また、HDLC方式テレコン信号の中継伝送限界距離は約 20km で、サイクリック方式テレコン信号の中継伝送限界距離は約 10km であった。これは、HDLC方式テレコンでは、HDLCの I フレーム内の情報のみをカプセル化して TCP で伝送する方式のため伝送品質低下の影響を受けにくい、サイクリック方式テレコンでは、モデムの音声波形をそのまま IP 化して UDP で伝送する方式のため伝送品質の低下（特にパケットロス）の影響を受けやすいと考えられる。

4.5 組立て・調整時間測定試験

組立て・調整時間測定試験では、災害用無線システムの組立て・調整を行って使用できる状態にするまでの時間を計測・評価した。

試験方法は、実際に 2 人および 3 人で屋外で災害用無線システムを組立て・調整するという一連

の作業をビデオ撮影し、その映像を再生させながら作業内容毎の作業時間を分割・記録した。

測定結果では、組立て・調整に要した時間は、作業員 2 人の場合、被災現場で 11 分（アンテナ組立 1.5 分、配線 2.8 分、機器調整 2 分、アンテナ方向調整 5 分）であった。

なお、アンテナ方向調整の時間は、試験では、対向する無線機の距離が近かったため、ほとんど時間がかかっていないが、現実的には対向を視認できず手間取るケースも考えられるため、長距離伝送試験で要した約 5 分とした。

4.6 電源連続供給試験

可搬型発電機について、燃料補給なしに連続供給できる時間を確認するため、電源連続供給試験を実施した。試験は燃料を満タンにして災害用無線システムを稼働させ、燃料が枯渇して停止するまでの時間を測定した。

なお、災害用無線システムは通信端末等の動作条件によって消費電力が異なるため、出来るだけ実運用に近い状態として、表 4 のような条件でアプリケーションを動作させた状態で測定した。

表 4 電源連続供給試験での模擬動作

機器	模擬動作	動作時間	間隔
パソコン	Excel ファイル表示	常時	-
	アンテナ調整サポートアプリ	常時	-
	iperf で TCP スループット測定	10 秒	5 分
	iperf で UDP スループット測定	10 秒	5 分
	iperf で PER 測定	30 秒	5 分
	ping で遅延時間測定	51 秒	5 分
	ftp でファイル(1.5MB)転送	-	5 分
カメラ	映像を相手局パソコンに送信	常時	-
電話	待ち受け・子機充電	常時	-

試験した結果、5kgLP ガスボンベを用いた可搬型発電機の場合の連続供給時間は 21 時間 33 分であった。

また、カセットガスボンベ対応の可搬型発電機についても同様に試験した結果、連続給電時間は 2 時間 40 分であった。

5. システム改良

5.1 現場技術者による評価試験

災害用無線システムをより現場で使い易いシステムとして完成度を高めることをねらいに、現場技術者がプロトタイプ機を試用（組立て・調整、操作）して使い勝手等を評価する試験を行った。

この評価試験は、四国電力5事業所（参加者合計30名）において実施した。

本試験では、プロトタイプ機を使って異なる事業所間に臨時回線を構成し、電話やネットワークカメラ等の通信端末を利用して、その品質等を確認した。試用後、アンケート調査により、システムの評価および改良点等の意見を集約した。

図20は評価結果を点数換算（良い=4点、やや良い=3点、普通=2点、やや悪い=1点、悪い=0点）して、評価項目毎の平均値をレーダーチャートにしたものである。

これより、全般的にみて良い評価が得られており、プロトタイプ機は現場ニーズをほぼ満足できることを確認できた一方、耐久性・耐環境性能が他項目に比べ評価が低く、現場技術者の要求度がさらに高いレベルにあることが分かった。

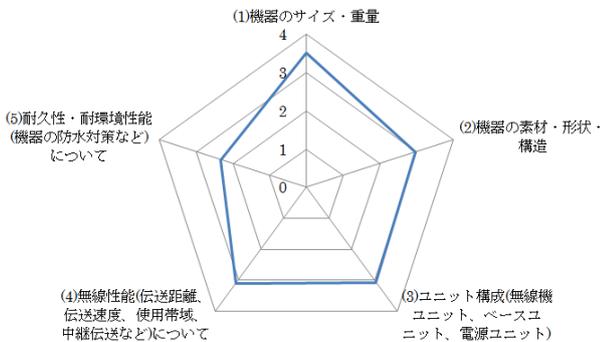


図19 現場技術者による評価結果

5.2 システム改良

現場技術者による評価試験で、要求レベルが高かった耐久性・耐環境性能について、表5のようにさらなる強化を図った。

さらに、少数意見でも、さらなる操作性の向上に役立つと考えられるものをピックアップして反映するようにし、表6のような改良を加えた。

表5 耐久性・耐環境性能の強化

項目	内容
耐久性向上	屋外用LANケーブルの採用
	フロントパネルの固定
耐環境性向上	ケーブル挿入口へのキャップの取り付け

表6 さらなる操作性の向上

項目	内容
誤接続防止	簡易接続図を機器内に貼り付け
動作確認の簡易化	無線機LEDを確認できるようにボックスを加工
アンテナ方向調整方法の改良	コンパスの設定角度を、"360-方位角"ではなく"方位角"になるように、アンテナ方向調整手順の変更
アプリケーションの操作性向上	アンテナ調整サポートアプリ画面の視認性向上

6.まとめ

大規模災害時に迅速かつ容易に臨時回線を構成できる災害用無線システムの開発を行った。

まず、システムの利用シーンや制約条件、さらに現場技術者の要望などをもとに、システム要件を設定し、システム設計を行った。

次に、プロトタイプ機を開発して各種フィールド試験を行ってその性能を評価し、想定した利用シーンで十分適用可能であるとの結論を得た。

さらに、プロトタイプ機に対する現場技術者の評価意見を参考にさらに改良を加えるなどしてシステムの完成度を高めた結果、実用化の目途が得られた。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)情報通信部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

1) 総務省九州総合通信局：「5GHz帯無線アクセスシステムの長距離海上電波伝搬特性及び集中豪雨減衰に関する調査検討会」報告書，平成22年3月

西条発電所周辺海域における付着生物の発生状況調査

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 柳原 哲
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 塩崎 景子

キーワード：冷却海水

貝

ミドリイガイ

生物付着カレンダー

Key Words : Cooling seawater

Shellfish

Asian green mussel *Perna viridis*

Sessile organism calendar

Occurrence Survey of Sessile Organisms in the Sea Area around Saijo Power Plant

Shikoku Research Institute, Inc., Department of Chemical and Biological Technologies

Tetsu Yanagihara and Keiko Shiozaki

Abstract

In recent years, the adhesion of green mussel (*Perna viridis*) at Shikoku Electric Power Co., Ltd. Saijo power plant cooling seawater system, which is located in the Seto Inland Sea has been confirmed. Therefore, we investigated of occurrence and adhesion season of sessile organisms such as *Perna viridis* in the sea area around Saijo power plant. The unraveled rope and PVC adhering plates were immersed in water intake, to investigate the adhering status of the shellfish. Also, the plankton in seawater was collected, and their gene analyses were performed to examine the occurrence of shellfish larvae.

As a result, the occurrence of green mussel (*Perna viridis*) in this study takes place over the summer from early summer, adhering happened a little late. Also, although blue mussel (*Mytilus galloprovincialis*) has occurred over the winter from late autumn, adhering was less. Barnacle has occurred through the years, it has been found to significantly adhere to the summer.

1. はじめに

火力プラントでは海水を冷却水に用いるためにその系統に海生生物が付着すると取水流量の低下や復水器管の伝熱性能の低下が起こり、延いては発電効率の低下や発電負荷の制限につながる恐れがある(図1)。

近年、瀬戸内海に立地している四国電力(株)西条発電所海水系統で、ミドリイガイの付着が確認されている。元来ミドリイガイは外来種で、国内では1960年代後半に兵庫県で発見されて以降、東京湾、伊勢湾など各地の海域で確認されている¹²⁾。

そこで、西条発電所周辺海域においてミドリイガイ等の付着生物の発生及び付着時期等の調査を行った。



図1 海水取水設備への生物付着状況

2. ミドリイガイ等の幼生発生、付着時期の把握

付着生物の付着時期や付着量を調べるために代表的な貝類3種(ミドリイガイ *Perna viridis*、ムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis* 及びタテジマフジツボ *Balanus amphitrite*) についての実態調査を行った。また、付着幼生の発生時期を把握するため、プランクトンネットを用いてプランクトンを採集し、採集したプランクトンについて遺伝子解析技術³⁾(*qPCR*)等を用いた貝類3種の幼生の定量を行った。

2.1 調査内容

(1) ミドリイガイ等の付着時期、付着量の実態調査

西条発電所取水口前面に付着板(塩ビ板(25×25 cm、厚さ5 mm程度)をヤスリで粗面加工し、四隅に固定用の穴を設けたもの)と付着ロープ(長さ30 cm、直径6 mm程度のクレモナロープの先端10 cmを解いたもの)を金属製のフレームに固定し、付着板の中心部が水面下1~2 mとなるよう垂下した(図

2, 3)。1ヶ月経過後にこれらを引き上げ、目視および顕微鏡観察により付着したイガイ類およびフジツボ類の種類(形態観察から判別可能なものについてのみ)、個体数ならびに湿重量を調査した。但し、付着板は前面中心部15 cm×15 cmの範囲、付着ロープは解いた先端部約10 cmを観察対象とした。付着板及び付着ロープは1ヶ月毎に新しいものと交換した。

一般に、イガイ類は、幼生の発生後、まず付着しやすい付着ロープに付着する。付着板ではその後の成長した海生生物を観察することができる。

(a) 調査項目

- ・付着板：イガイ類およびフジツボ類の付着状況調査(種類、個体数、湿重量)
- ・付着ロープ：イガイ類の付着状況調査(種類、個体数、湿重量)

(b) 調査期間・頻度

- ・平成25年4月~平成27年12月、1回/月

(2) ミドリイガイ等の付着幼生の同定や定量調査

イガイ類・フジツボ類幼生の発生動態を調査するためにプランクトンネット(NXX13、φ22.5 cm相当)等を用いてプランクトンを採集し(ろ過海水量500 L程度)、得られたプランクトン試料をリアルタイムPCR(*qPCR*)解析に供し、付着生物幼生の検出定量を行った。

(a) 調査項目

- ・*qPCR*解析によるミドリイガイ、ムラサキイガイ及びタテジマフジツボ幼生の検出、定量

(b) 調査期間・頻度

- ・平成25年4月~平成27年12月、2回/月(満月及び新月を目処に実施)

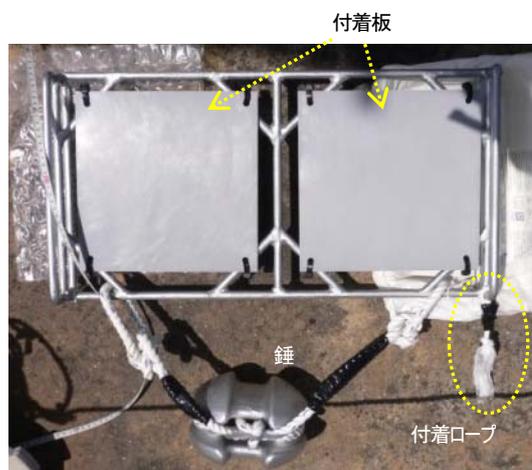


図2 付着ロープ及び付着板の外観

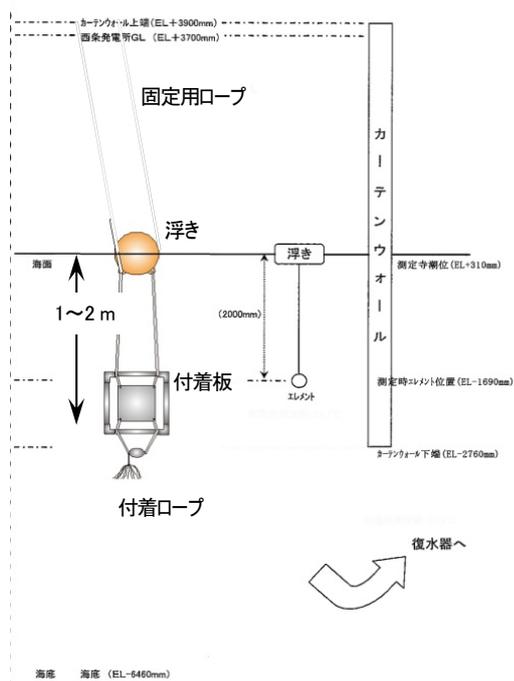


図3 付着板等設置状況

2.2 調査結果

(1) 付着ロープによる付着状況

付着ロープの外観からは海生生物の付着割合の差は特に認められなかった。(表1)

ミドリイガイは、6月下旬～9月下旬までの間で確認され、6月下旬～7月下旬に最も多く確認された。また、9月下旬～翌年6月の間にはミドリイガイの個体は確認されなかった(図4)。

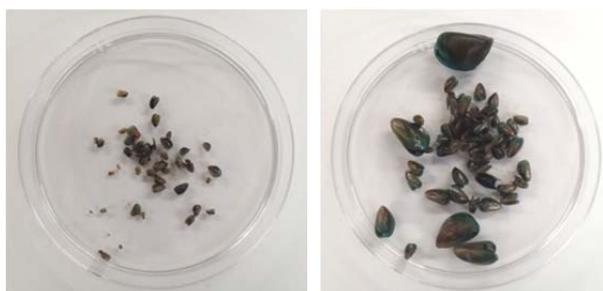


図4 付着ロープから検出されたミドリイガイ(一例)

ムラサキイガイについては、観察範囲からは検出されなかったが、2015年5月下旬～6月下旬に付着ロープの結び目付近から2個体確認された。今回3年間の調査期間のうちムラサキイガイの付着が確認されたのはこの時のみであった。

(2) 付着板による付着状況

付着板は3月から夏場にかけて海生生物の付着割合の増加が観察され、7月頃からミドリイガイの付着がみられ、その後8月にピークがみられ、2~3cm程度の大きさに成長したミドリイガイが確認された。(図5, 表2)。

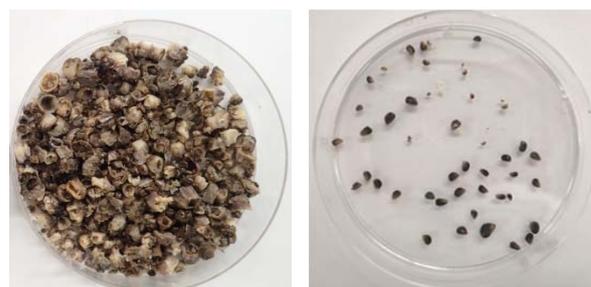
ムラサキイガイは観察対象区での付着はみられなかったが、6月頃対象区外での付着がみられた。また、フジツボ類は5月頃から付着がみられ、7月～8月にかけてピークがみられ、12月頃までフジツボ類が確認された。

付着板にはフジツボ類としてタテジマフジツボ、シロスジフジツボ、サンカクフジツボ、アメリカフジツボ、ドロフジツボ等の6種類以上、イガイ類としてミドリイガイ及びムラサキイガイ、他にカキ類やフサコケムシが確認された(図6)。

年間通じての付着状況を連続付着板によって確認した(表3)。春先から初夏にかけてフサコケムシが付着板全面で成長し、その後夏にフジツボが繁殖していた。晩夏頃からミドリイガイが、特にフレーム部などの海流の遅くなるようなところを中心に付着がみられ、その後成長していた。秋以降の水温の低下により移動等が起こっており、冬以降さらなる水温の低下によって死滅し、その後落下等が起こっていることが確認されたことから、取水の流れに沿って系統内にミドリイガイが流入する可能性が考えられる。



図5 代表的な付着状況(2015年11月)



(a) タテジマフジツボ (b) ミドリイガイ

図6 付着板から検出された貝類(一例)

表1 取水口設置ロープの外観および貝類検出結果

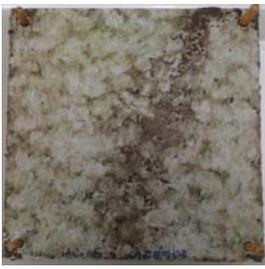
期 間	2014年12月 ～2015年1月	2015年1月 ～2015年2月	2015年2月 ～2015年3月
外 観			
ミドリイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)

期 間	2015年3月 ～2015年4月	2015年4月 ～2015年5月	2015年5月 ～2015年6月
外 観			
ミドリイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)

期 間	2015年6月 ～2015年7月	2015年7月 ～2015年8月	2015年8月 ～2015年9月
外 観			
ミドリイガイ	140 個体 (0.15 g)	75 個体 (1.62 g)	106 個体 (4.18 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	5 個体 (0.07 g)	35 個体 (0.52 g)	4 個体 (0.03 g)

期 間	2015年9月 ～2015年10月	2015年10月 ～2015年11月	2015年11月 ～2015年12月
外 観			
ミドリイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)

表2 取水口設置附着板の外観および貝類検出結果

期 間	2014年12月 ～2015年1月	2015年1月 ～2015年2月	2015年2月 ～2015年3月	2015年3月 ～2015年4月
外 観				
ミドリイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
フジツボ類	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)

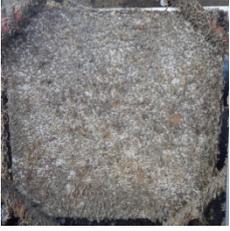
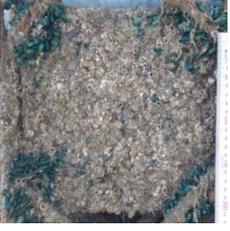
期 間	2015年4月 ～2015年5月	2015年5月 ～2015年6月	2015年6月 ～2015年7月	2015年7月 ～2015年8月
外 観				
ミドリイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	48 個体 (0.10 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	5 個体 (0.03g)
フジツボ類	0 個体 (0 g)	248 個体 (4.76 g)	497 個体 (— g)	1,818 個体 (132.89 g)

— : 極小型のため重量測定不可能

期 間	2015年8月 ～2015年9月	2015年9月 ～2015年10月	2015年10月 ～2015年11月	2015年11月 ～2015年12月
外 観				
ミドリイガイ	43 個体 (0.21 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
ムラサキイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
その他のイガイ	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)	0 個体 (0 g)
フジツボ類	1,019 個体 (79.85 g)	99 個体 (1.78 g)	0 個体 (0 g)	10 個体 (— g)

— : 極小型のため重量測定不可能

表3 取水口に設置された連続付着板の外観写真（設置日：2015年3月）

	2015年4月 (1ヶ月)	2015年5月 (2ヶ月)	2015年6月 (3ヶ月)	2015年7月 (4ヶ月)
表				
裏				
	2015年8月 (5ヶ月)	2015年9月 (6ヶ月)	2015年10月 (7ヶ月)	2015年11月 (8ヶ月)
表				
裏				
	2015年12月 (9ヶ月)	2016年1月 (10ヶ月)	2016年2月 (11ヶ月)	2016年3月 (12ヶ月)
表				
裏				

(3) プランクトン調査による発生状況

ミドリイガイの個体数は、5月下旬から検出されはじめ、7月下旬にかけてピークを示した。その後一度減少し、再び9月頃、若干増加する傾向が認められ、12月頃まで検出された。

ムラサキイガイについては4月～6月頃まで少量の個体数が検出されたが、これは春先の水温上昇に伴う死滅前の産卵によるものと考えられ、幼生の付着、成長には影響ないと考えられる。6月下旬から10月下旬の間は検出されず、11月以降出現が確認された。

タテジマフジツボは、年間を通して検出された。春先から夏に向けて徐々に増加し、8月～9月にかけてピークを示し、それ以降徐々に減少傾向を示し、1月頃までは検出された。

3. 生物付着カレンダー作成

これまでの調査結果から、西条発電所前面海域におけるミドリイガイ等の生物付着カレンダーを作成した(図7)。

(1) ミドリイガイ

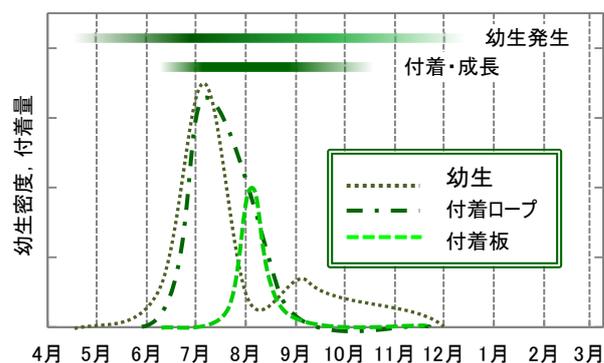
幼生は5月頃から発生し始め、7月から8月にかけて流入のピークがみられる。流入した幼生は6月後半から付着が起り、7月から8月にかけて付着のピークとなる。9月以降で海水温が下がると再び幼生の発生が見られ、11月頃まで確認されることがあるが、付着は10月以降起こっていない。

(2) ムラサキイガイ

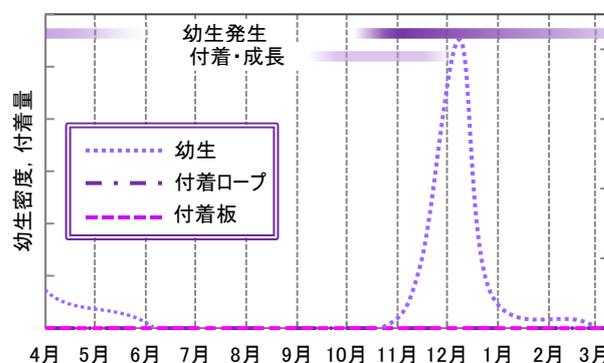
11月頃から幼生の出現が確認され、翌年5月頃まで断続的に確認されたが、ミドリイガイに比べ約1/10程度で、その間も付着はほとんど確認されなかった。7月から10月の間は幼生の出現や付着は起こっていない。

(3) タテジマフジツボ

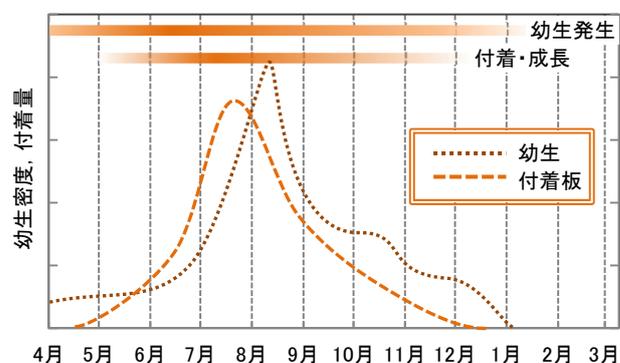
幼生の出現時期は4月から翌年1月頃まで長期間にわたり、7月から9月にかけて流入のピークがみられる。流入した幼生は5月から付着が起り、8月にピークとなる。その後翌年1月頃まで幼生の発生や付着が起こっている。



(a) ミドリイガイ



(b) ムラサキイガイ



(c) タテジマフジツボ

図7 付着生物の生物付着カレンダー
(西条発電所周辺海域)

4. まとめ

今回の約3年間にわたる付着生物の発生及び付着状況等を調査した結果、外来種であるミドリイガイは初夏から夏にかけて幼生が発生し少し遅れて付着が起こることがわかった。また、冬場の海水温の低下により死滅することも確認された。

ムラサキイガイは晩秋から冬にかけて発生しているが、付着は少なかった。

フジツボ類については通年を通して発生しており、夏場にかかり付着することがわかった。

これらの結果より、ミドリイガイへの対策に重点を置く場合、設備の点検等は10月頃から3月の間に実施することが望ましい。また、ミドリイガイの出現や付着時期となる5月から10月にかけて、付着防止対策を適切に行うことが重要であると考えられる。

〔謝辞〕

本研究は四国電力(株)火力部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 濱田 稔, “バイオ技術特集”, 中部電力技術開発ニュース, No.141 (2011)
- 2) 立田 譲, 坂口 勇, 濱田 稔, 杉本 正昭, 津野 雅俊, “水温上昇による付着生物生息分布の変化—現場分布調査と文献情報による検討—”, 電力中央研究所報告, V13003 (2013)
- 3) 野方 靖行, 遠藤 紀之, “遺伝情報を用いた付着生物幼生の動態観測”, 電力中央研究所報告, V11031 (2011)

近赤外光照射による青果物鮮度保持技術「iR フレッシュ」の開発

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 石田 豊
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 秦 亜矢子
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 垣渕 和正

キーワード： 青果物
鮮度保持
近赤外光
照射

Key Words : Vegetables
Fruit
Freshness retention
Near infrared light
Irradiation

The development of the fruit and vegetables fresh-keeping technology "iR fresh" by the near infrared light irradiation

Shikoku Research Institute, Inc., Department of Chemical and Biological Technologies
Yutaka Ishida, Ayako Hada and Kazumasa Kakibuchi

Abstract

As new postharvest freshness holding method of fruits and vegetables, we have developed a technology for the short-term irradiation of near infrared light, it was named the technology as "iR fresh". We have developed the practical-type irradiation apparatus using an light-emitting diode (LED) or laser as a light source can be used for this technology. It examined the freshness holding effects by using this irradiation device. In experiments with these devices, various freshness retention effects, for example, suppression of shriveled in spinach, maintenance of gloss of the pericarp in eggplant, and suppression of mold occurrence in the strawberry has been confirmed. By using these irradiation devices for near infrared light, it is possible continuous treatment with conveyor and short time batch processing. These results suggest that postharvest short-term near infrared radiation has a promising as a new quality control technique during the storage and transportation of fruits and vegetables.

1. はじめに

野菜や果物など青果物の生産や流通において、収穫後の鮮度保持は、商品価値に大きく影響するため非常に重要である。青果物の鮮度保持の手段としては従来から冷蔵やフィルム包装の手段が主に用いられてきた^{1,2)}。前者においては、対象とする青果物の品温をより短時間に下げるために真空予冷や差圧通風予冷などの方法が開発されるとともに、冷蔵輸送や冷蔵ショーケースなどによるコールドチェーンの整備が進められている。また後者では、ガス透過性に特徴を持たせたフィルム包装が盛んに利用されている。その一方で、青果物の遠距離輸送やカット野菜の普及など青果物の流通や加工は多様化しており、新たな鮮度保持技術が求められている^{3,4)}。

一方で、植物に対する各種波長の光の影響については、菊の電照栽培や完全人工光植物工場での葉菜類栽培を中心に数多くの研究事例があるが^{5,6)}、これに対して収穫後の光照射についての研究は比較的少ない。これまでに、白色光連続弱光照射によるハウレンソウやコマツナのクロロフィル維持や⁷⁾、低温下で弱い赤色光および青色光を照射することによるスイートコーンの品質保持⁸⁾、赤色光照射によるブロッコリーの老化遅延⁹⁾などが検討され、可視光の弱光照射が青果物の鮮度保持に効果があることが報告されている。可視光より波長の長い近赤外光については、730nm付近の光照射がジャガイモの萌芽抑制に効果があることが報告されている¹⁰⁾。

こうした中で、筆者らは、各種波長の光が植物に及ぼす影響を調べる中で、発光ダイオード(LED)から発する700nm～1,000nmの光を14W/m²の強度で5～10分間程度の短期間照射することにより、蒸散量が抑制されることを初めて見出し、その効果は活性酸素種(ROS)生成による気孔閉鎖促進が関与することを示した¹¹⁾。さらに、この効果は流通レベルの葉菜類(リーフレタス、ハウレンソウ、コマツナ)でも発揮され、外観での品質保持効果も確認され、青果物流通における新規な鮮度保持技術として利用できる可能性を示した¹²⁾。

本技術は「iR フレッシュ」という名称での商標や特許の出願を行い登録に至っている。しかしながら上記の鮮度保持効果は14W/m²の光強度

で5分間程度の照射によるものであり、実用化を図るには照射時間を1分以下に短縮する必要があると考えられた。収穫後の青果物に及ぼす近赤外光照射のメカニズムについてはまだ明らかになっていないが、ROSの生成を伴うことから一種のストレス刺激であると推察される。そのため照射時の光強度を上げることで照射時間が短縮できると考え、光源としてLEDおよびレーザーを用いた実用型照射装置を試作した。これらの照射装置のうちより実用性が高いと考えられるレーザータイプの照射装置を主に使用して流通レベルの数種青果物の鮮度保持効果を検証した。

2. 照射装置の開発

2.1 LEDタイプ

近赤外LEDを用いた照射装置を、(株)日本システムグループ(愛媛県西条市)と共同で開発した(写真1)。この照射装置は、614mm×414mmのパネルに中心波長850nmの砲弾型LEDを3,290個実装した面発光タイプであり、照射面で300W/m²以上の光出力が可能である。LEDを実



写真1 LEDタイプの照射装置
上：照射部、下：電源部

装した照射部の下約 15cm～30cm に照射したい青果物を置き、タイマー制御により 0.1 秒以上の任意の照射時間を設定することが出来る。照射時間は対象とする青果物により若干変わるものの 1 秒程度であり、収穫コンテナ単位で迅速なバッチ処理が可能であることから、手作業での出荷調整を行っている比較的小規模な生産現場に適している。また、大学や公設試験場での試験研究用とかレーザータイプでの試験に先立つ予備検討などにも適している。

2.2 レーザータイプ

レボックス(株) (神奈川県相模原市) が開発した中心波長 830nm の近赤外光を発する面発光型レーザー光源『フォトンラップ』を内蔵した実用型の照射装置を三井金属計測機工(株) (愛知県小牧市) が試作した (写真 2)。この装置では、レーザー光を光ファイバーからライトガイドを通して線状に照射することができ、照射面で 800W/m² 以上の光出力が可能である。照射装置の外部に近赤外光が漏れないように遮蔽を行うとともに稼働状況をパイロットランプで表示するなど安全面での配慮も行っている。本装置はベルトコンベアと連動させての連続処理が可能なインライン型であるため、青果物の共同選果場や集出荷場など比較的大規模な施設に適している。



写真 2 レーザータイプの照射装置

3. 鮮度保持効果の検証

3.1 材料および方法

(1) 供試材料

ホウレンソウ (岐阜県産、品種不明)、ナス (高知県産、品種‘土佐鷹なす’)、イチゴ (香川県産、品種‘さぬきひめ’) を用いた。いずれも市販品を購入し、傷があるものやサイズが大きく異なる個体を除いて試験に供した。

(2) 近赤外光の照射と貯蔵

LED タイプの照射装置では、パネル型の照射装置の下に供試材料を置き、供試材料の上面での光強度が 300W/m² になるように調整した。照射時間は電源部に内蔵されたタイマー機能により設定した。

レーザータイプの照射装置では、レーザー光源の出力を最大に設定し、ベルトコンベアの手速を低速 (125mm/秒)、中速 (250mm/秒)、高速 (500mm/秒) に変えて照射した。近赤外光を照射するライトガイドはベルトコンベアの上方 350mm の位置に固定し、ライトガイドから下向きに照射した。この条件での光強度は 800W/m² であり、ベルトコンベアの移動方向に対して幅 8cm の範囲で 500W/m² 以上の光強度であった。

LED タイプ、レーザータイプともに、照射は実験室内の白色蛍光灯照明下で行った。

近赤外光照射後は、各試験区間での環境条件を同一にして 10℃ の保冷庫内で貯蔵した。

(3) 鮮度保持効果の評価

蒸散率は、個々の青果物の重量に基づき、下記の計算式で算出した。

$$\text{蒸散率(\%)} = 100 \times \frac{[(\text{貯蔵前の新鮮重}) - (\text{貯蔵後の新鮮重})]}{[(\text{貯蔵前の新鮮重})]}$$

茎や葉、果実の硬度は、果実硬度計 (藤原製作所製、ホウレンソウとイチゴでは 1kg 計、ナスでは 5kg 計、円錐プランジャー) を用いて測定した。ホウレンソウの外観評価は、北海道立総合研究機構・農業研究本部の方法¹³⁾ に準じて行った。すなわち、茎と葉の萎れの程度を観察し、5 段階評価 (5: 試験開始時の状態、4: ごく僅かに萎れ、3: 明らかな萎れ、2: 萎れが進行、1: 完全に萎れ) で行った。ナスについてもこれに準じて、数字が大きいほど試験開始時の健全な状態で

あるとして5段階評価を行った。色彩分析は、色彩色差計（ミノルタ製 CR-200）を用い、L*a*b*表色系で測定した。

3.2 結果および考察

(1) ホウレンソウへの効果

ホウレンソウへの近赤外光の照射はレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②コンベア高速×1回照射、③コンベア中速×1回照射、④コンベア低速×1回照射、⑤コンベア低速×3回照射、⑥コンベア低速×6回照射という6通りとし、各4株のホウレンソウを用いた。ホウレンソウはプラスチックトレイ（20cm×30cm）に置いた状態で照射を行い、照射後はトレイごとポリエチレン袋（30cm×45cm、厚さ0.03mm）に収納した後、袋の口を二重折りにし口をテープでとめ、10℃の冷蔵庫内で6日間貯蔵した。鮮度の評価は、蒸散率（重量変化）、株元付近の茎硬度、茎と葉の外観観察により行い、蒸散率は2日後と6日後に、他の項目は6日後に行った。

蒸散率については、低速6回では逆に2日後の蒸散率が無照射よりも大きくなったものの、これ以外では近赤外光照射により低減し、中速1回から低速3回までが効果は大きかった（表1）。茎硬度についても近赤外光照射は無照射を上回っていたが、特に中速1回と低速1回で高い値を示した（表2）。外観評価でも近赤外光照射は無照射を上回っていたが、低速1回と低速3回が特に優れていた（表2、写真3）。

表1 ホウレンソウの蒸散率に及ぼす近赤外光照射の効果（6日後）

試験区	蒸散率(%) ^a (無照射を100とした相対値)	
	2日後	6日後
無照射	2.84±0.72 (100)	5.43±1.45 (100)
高速1回	2.47±0.67 (87)	4.89±1.04 (90)
中速1回	2.43±0.65 (86)	3.79±0.89 (70)
低速1回	2.09±0.30 (74)	4.10±0.99 (76)
低速3回	2.05±0.15 (72)	4.06±0.68 (75)
低速6回	3.25±1.48 (114)	4.78±1.61 (88)

a, 平均±標準偏差

以上の結果から、ホウレンソウに対する最適な照射条件は中速1回から低速3回であると考えられた。無照射では貯蔵6日後には蒸散率が5%を超え外観的にも商品性を失っていたが、近赤外光照射により蒸散率は4%程度にとどまっていたことや外観的にも商品性を保っていたことから、付加的な鮮度保持方法となり得るものと考えられた。

表2 ホウレンソウの茎硬度や外観に及ぼす近赤外光照射の効果（6日後）

試験区	茎硬(kgf) ^a (無照射を100とした相対値)	外観評価 ^a	
		茎部	葉部
無照射	0.69±0.08 (100)	2.5±0.6	2.0±0
高速1回	0.75±0.04 (109)	3.0±0.0	2.5±0.6
中速1回	0.75±0.05 (109)	4.0±0.0	2.5±0.6
低速1回	0.78±0.06 (113)	4.0±0.0	3.3±0.5
低速3回	0.79±0.06 (114)	4.0±0.0	4.0±0.0
低速6回	0.74±0.04 (107)	3.8±0.5	3.3±0.5

a, 平均±標準偏差



写真3 ホウレンソウの萎れ具合の比較（6日後）

(2)ナスへの効果

ナスへの近赤外光の照射はレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②コンベア中速×1回照射、③コンベア低速×1回照射という3通りとし、各9本のナスを用いた。ナスはプラスチックトレイ（20cm×30cm）に置いた状態で照射を行い、照射後は市販時に使用されていた小孔のある高密度ポリエチレン製フィルムに3本ずつ収納し、10℃の冷蔵庫内で9日間貯蔵した。鮮度の評価は、蒸散率（重量変化）、果実硬度、外観観察（果皮光沢）、果実切断面の観察により行った。

蒸散率については、近赤外光照射による低減は、見られなかったが、果実硬度は中速1回で僅かに上昇した（表3）。外観観察では、近赤外光照射により果皮光沢が維持されており、さらに果実を切断して種子変色の状態を観察すると無照射ではかなり褐変が進んでいたのに対して近赤外光照射により褐変が大幅に抑制されていた（表4、写真4）。

以上の結果から、ナスに対する最適な照射条件は中速1回であり、品質面では果皮の光沢維持や低温障害や果実老化によって発生する種子変色の抑制に効果があることが分かり、ナスについても鮮度保持の手段となり得ると考えられた。

表3 ナスの蒸散率と果実硬度に及ぼす近赤外光照射の効果（9日後）

試験区	蒸散率(%) ^a (無照射を100とした相対値)	果実硬度(kgf) ^a (無照射を100とした相対値)
無照射	1.38±0.55 (100)	2.17±0.21 (100)
中速1回	1.32±0.56 (96)	2.24±0.19 (103)
低速1回	1.38±0.34 (100)	2.17±0.11 (100)

a, 平均±標準偏差

表4 ナスの果皮光沢と種子変色に及ぼす近赤外光照射の効果（9日後）

試験区	果皮光沢 ^a	種子変色 ^a
無照射	3.78±0.67	2.22±1.09
中速1回	4.22±0.44	4.44±0.53
低速1回	3.89±0.60	4.33±0.50

a, 平均±標準偏差

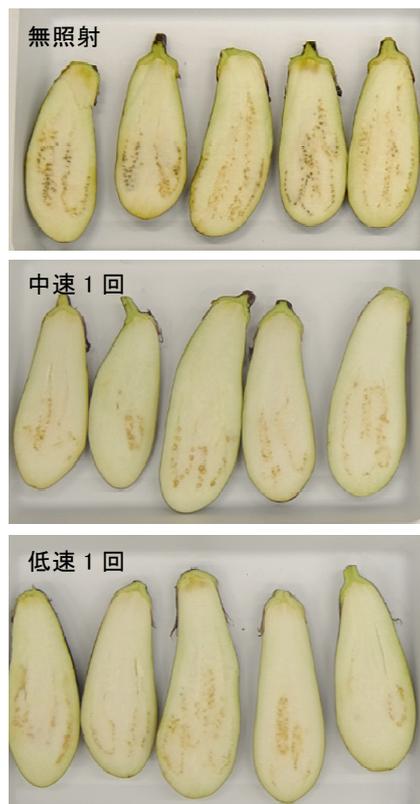


写真4 ナスの種子変色の比較（9日後）

(3)イチゴへの効果

イチゴへの近赤外光の照射はLEDタイプおよびレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②LEDタイプ（300W/m²×1秒照射）、③レーザータイプ（コンベア低速×1回照射）という3通りとし、各12個のイチゴを用いた。イチゴは市販時のプラスチックトレイ内に1段積みとし透明フィルムで覆われている状態で上方から照射を行った。照射後は10℃の冷蔵庫内で14日間貯蔵した。鮮度の評価は、かび発生率、果実硬度、へた部の色調の分析により行った。

かびの発生については、無照射では12個中3個にカビが発生したが、LEDタイプおよびレーザータイプの照射装置で近赤外光を照射したものには発生が見られなかった（写真5）。果実硬度については、僅かではあるものの近赤外光を照射したイチゴが大きい値を示した（表5）。へた部については、近赤外光を照射したイチゴは無照射に比べても目視において緑色を保っていたが、これは色彩分析に結果によりb*値が小さい傾向にあることから裏付けられた（表6）。

以上の結果から、イチゴに近赤外光を照射することにより、流通時や加工時に問題となっているかびの発生を抑制できるとともに、果実硬度が維持されることから流通時の傷みも低減できる可能性があることが分かった。この効果はLEDタイプの照射装置でも発揮されることから、イチゴ生産者が出荷調整を行う際にも利用可能であると考えられる。

今回報告したハウレンソウ、ナス、イチゴ以外にも、リーフレタス、青ネギ、トマト、キュウリなど幅広い対象で同様の効果が発揮できることが明らかになりつつある。最適照射条件としては、LEDタイプの照射装置では100W/m²の光強度で10秒程度または300W/m²の光強度で1秒程度であり、レーザータイプの照射装置ではベルトコンベア速度として低速(125mm/秒)または中速(250mm/秒)で1回照射であることが明らかになっている。今後はこれらの照射条件で実証試験等を重ね、これまでにない全く新規な鮮度保持方法として普及拡大を進めることとしている。あわせてメカニズムの解明も進めている。

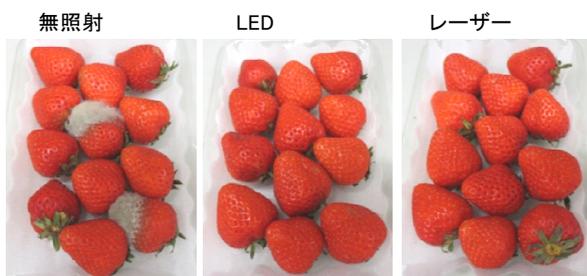


写真5 イチゴのかび発生状況の比較
(14日後)

表5 イチゴの果実硬度に及ぼす
近赤外光照射の効果 (14日後)

試験区	果実硬度(kgf) ^a (無照射を100 とした相対値)
無照射	0.31±0.06 (100)
LED 300W/m ² 1秒	0.37±0.05 (119)
レーザー 低速1回	0.36±0.05 (116)

a, 平均±標準偏差

表6 イチゴへのたの色調に及ぼす
近赤外光照射の効果 (14日後)

試験区	色調		
	L*	a*	b*
無照射	67.66 ±0.99	-0.18 ±0.69	6.87 ±1.20
LED 300W/m ² 1秒	67.10 ±1.12	-0.76 ±0.93	6.16 ±1.56
レーザー 低速1回	67.05 ±0.66	-0.23 ±0.98	6.25 ±0.88

a, 平均±標準偏差

4. まとめ

近赤外光照射による青果物鮮度保持に使用できる光源としてLEDおよびレーザーを用いた実用型照射装置を試作した。これらの照射装置のうちより実用性が高いと考えられるレーザータイプの照射装置を主に使用してハウレンソウ、ナス、イチゴに対する鮮度保持効果を検証した。その結果、ハウレンソウでは萎び抑制、ナスでは果皮の艶維持や果実内部の種子変色の抑制、イチゴではかび抑制や果実硬度の維持などの効果が確認できた。今回試作した照射装置を用いることでコンベアによる連続処理や1秒程度の短時間処理が可能となり実用性もあると考えられた。

【謝辞】

近赤外光照射装置の試作および効果の検証にご協力いただいた、(株)日本システムグループ、レボックス(株)、三井金属計測機工(株)など関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 樽谷隆之, 北川博敏: 園芸食品の流通・貯蔵・加工, 養賢堂(1982)
- 2) 岩本睦夫ら: 青果物・花き鮮度管理ハンドブック, サイエンスフォーラム(1991)
- 3) 中村怜之輔: 園芸生産物の流通環境条件に関する生理学的考察, 岡山大学農学部学術報告, 87, 251-264(1998)
- 4) 農林水産省生産局農産部園芸作物課資料: 今後の野菜の生産と流通をめぐる課題, http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/yasai_zyukyu/y_h29_mitosi/pdf/yasai_seisan_meguru_kadai.pdf (2012)

- 5) 石倉聡ら：キクの電照抑制栽培に用いる白熱電球代替光源としての電球型蛍光灯およびLEDの光エネルギー特性と開花抑制効果，広島県立総合技術研究所農業技術センター研究期報，84，1-6（2009）
- 6) 庄子和博ら：育苗段階における青色LED照射がサニーレタス苗の品質と定植後の生育に及ぼす影響，電力中央研究所報告，V10032（2011）
- 7) 上田悦範：野菜の高品質を目指した光を併用する冷蔵法（光冷蔵法），浦上財団研究報告書，11，9-17（2003）
- 8) 太田浩一，太田万理，鈴木鐵也：収穫後包皮付スイートコーンの弱光LED低温照射による品質保持および旨み成分増強効果，植物環境工学，20，31-36（2008）
- 9) Ma, G. L. et al.：Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli, Postharvest Biol. Technol., 94, 97-103（2014）
- 10) 原田和夫：緑化防止方法，特許公開2010-187598（2010）
- 11) Kozuki, A. et al.：Effect of postharvest short-term radiation of near infrared light on transpiration of lettuce leaf, Postharvest Biol. Technol., 108, 78-85（2015）
- 12) 高附亜矢子ら：収穫後の近赤外光照射が数種葉菜類の蒸散、気孔開度および外観品質に及ぼす影響，園芸学研究，15，197-206（2016）
- 13) 鮮度保持に関する試験方法・項目，北海道立総合研究機構・農業研究本部資料，https://www.hro.or.jp/list/agricultural/research/hanayasai/04hana_yasai_info/02youryou/fresh/veg/yasai.pdf

太陽光発電の出力実績推定・予測システムの開発と実用化

(株)四国総合研究所 電力技術部 瀧川 喜義

キーワード： 太陽光発電
出力推定
出力予測
気象庁数値予報
衛星雲画像

Key Words : Photovoltaics
Output Estimation
Output Prediction
JMA-GPV
Satellite Cloud Image

Development and Practical Use of Estimation and Prediction System of PV.

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technologies
Kiyoshi Takigawa

Abstract

Photovoltaics (PV) are rapidly spreading, since they are clean renewable energy and don't emit CO₂. However, when PV systems are introduced in large quantities, there are concerns about the potential effects on the operation of electric power system, because their output are changed according to the weather and we can't control them. We need to effectively use their generated power in the planning and controlling of an electric power system.

We developed the estimation system of PV output in real time using measurements of solar radiation and cloud images of meteorological satellite. And we developed the prediction system using JMA-GPV and cloud images of meteorological satellite.

In this paper, we explain these estimation and prediction method and practical use system.

1. はじめに

太陽光発電(PV)は発電中に二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーとして注目されており、固定価格買取制度などとも相まって急速に導入が進んでいる。四国電力管内においても、H28年4月末時点で既に178万kWのPVが接続済みとなっており、契約申し込み済みのものを含めると262万kWの導入量が見込まれている(図1)。

ところがPVの出力は天候に依存することから、大量導入時には日々の出力変動が中型の火力発電機数台分に達すると予想される。夏冬の重負荷期の需要が約500万kW、春秋の軽負荷期の需要が約300万kWである四国電力にとってPVの占める割合は大きく、PVの導入量増加に伴い電力の需給運用に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。

そこで、我々はPVの出力を日々の需給運用における計画や制御に的確に組み込み、電力の安定運用が図れるように将来の出力を予測するシステムの開発を進めてきた^{1)~11)}。

これまでに、電力会社トータルのPV出力をリアルタイムに把握するPV出力実績推定システムを開発し、H26年10月から四国電力の中央給電指令所(以下、四電中給)において実運用を開始した。これに続き、H27年10月より将来のPV出力を予測するPV出力予測システムの実運用を開始したのでこれらのシステムの概要を紹介する。

本システムはH28年3月までに気象衛星ひまわり8号の10分データへの対応を完了し、現在2.5分データへの対応について検討を進めているが、本稿は技術開発の経緯等についても明らかにでき

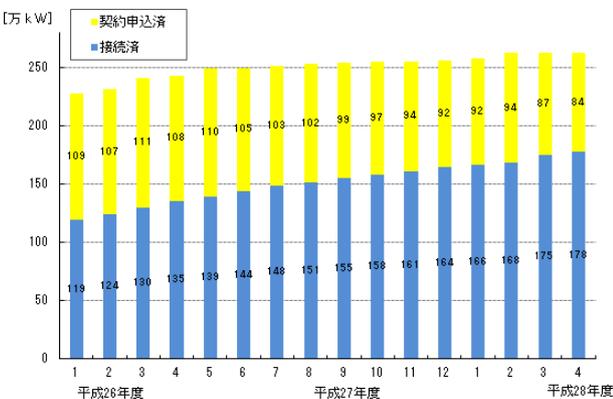


図1. 四国電力におけるPV設備の申込み状況 (H28/4末時点：四国電力のHPより)

るように、気象衛星ひまわり7号の可視画像(以下、衛星画像)使用時のシステムを中心に報告する。

2. 開発スケジュール

PV出力予測システムのこれまでの開発スケジュールを図2に示す。本システムはH21年に四国総合研究所(以下、四国総研)において基礎研究を開始し、予測手法に関する特許を出願(H27年4月に登録済)するとともに、H22年からは四国電力と協力しながら早期のシステム開発および実用化を目指して研究を進めてきた。

本システムはメガソーラなどの個々のPVではなく、電力会社管内のトータルのPV出力を算出して需給運用に活用することを主目的としたもので、PV出力実績推定システムとPV出力予測システムの2つで構成されている。

PVは家庭用に代表されるように規模の小さな設備が広い範囲に分散して設置されるため、現時点では一部の大規模PV発電所を除いて出力のオンライン計測を行っておらず、電力会社管内の総出力をリアルタイムに計測することはできない。しかし、PVの出力実績は、電力会社の需給運用の基盤となるロードカーブ管理において重要であるほか、PV出力予測システムの開発にあたっては出力実績値がなければ予測モデルのチューニングができないうえ、仮に予測値が計算できたとしても予測精度の評価すら行うことができない。そこで、我々は、電力会社管内のPV出力を正確に把握することが喫緊の課題であると考え、2つのシステ

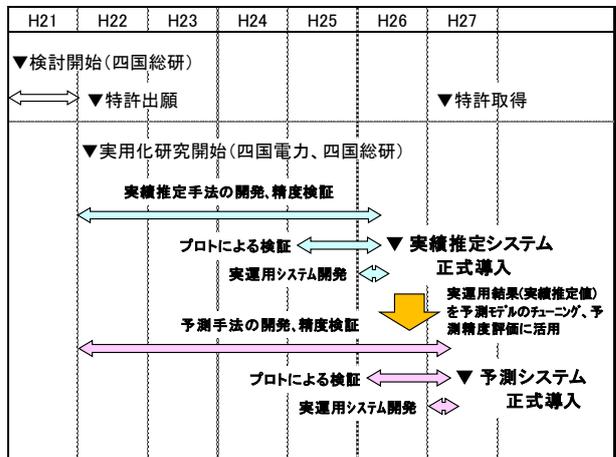


図2. PV出力予測システムの開発スケジュール

ムのうち PV 出力実績推定システムを先行して開発することとした。

PV 出力実績推定システムは H22～H24 年度の研究で推定精度などの面で実用化の見通しが得られたことから、H25 年度にプロトタイプシステムを構築して実時間での検証を行うとともに、運用者の意見や要望等も取入れながら改良を図った。その後、H26 年度上期にこれまでの研究成果をベースに信頼性の高い実運用システムを開発し、H26 年 10 月から四電中給において PV 出力実績推定値の本運用を開始した。

PV 出力予測システムについては PV 出力実績推定システムと平行して開発を行ってきたが、PV 出力実績推定システムの試運用や実運用を通して蓄積した PV 出力実績値を活用して予測モデルのチューニングおよび予測精度の評価を実施し、H26 年度にプロトタイプシステムによる検証を行った後、H27 年度上期に実運用システムを開発し、H27 年 10 月から四電中給において PV 出力予測値の本運用を開始した。

3. PV 出力実績推定システム

PV 出力実績推定手法の概要を図 3 に示す。本手法は四国内 5km メッシュの日射分布を把握する前半部と 5km メッシュの日射分布から PV 出力に変換する後半部の 2 つに大きく分けることができる。

このうち前半部の日射分布の把握は四国内 15 か所の日射計測値（四国電力において日射計を使ったリアルタイム計測を実施）と衛星画像を活用し、日射計測を行っているメッシュは日射計測値をそのまま用い、日射計測を行っていないメッシュは衛星画像から算定した推定日射を用いることで四国内 5km メッシュの日射分布を求めている。後半部の PV 出力への変換は 5km メッシュ毎に

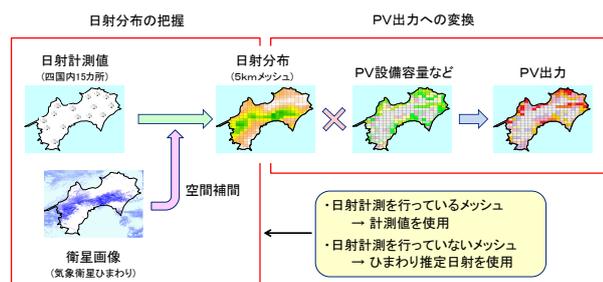


図 3 PV 出力実績推定手法の概要

PV の設備容量やパネルの設置状況、出力係数、自家消費などを考慮しながら PV 出力を計算し、全メッシュの出力を合計することで電力会社トータルの PV 出力に換算している。なお、都道府県別や電力会社の営業所別にメッシュ値を集計することにより、エリア毎の値を計算することも可能である。

3.1 日射分布の把握

前半部の日射分布の把握手法の詳細を図 4 に示す。上段の日射計測値は日射量であるためそのまま用いることができるが、衛星画像は雲や地面の反射能（アルベド）を観測しているために地面の日射量に変換する必要がある。そこで、図に示すように数多くの手法を組み合わせることで変換を行っている。これらの手法の概要を以下に示す。

(1)位置ずれ補正

衛星画像は日本領域において約 1.5km の解像度があるが、衛星にかかる引力などの外乱や姿勢制御などに伴うセンサーのぶれにより、観測画像に位置ずれが発生する可能性がある。このような場合、そのままでは衛星画像の画素と地面の緯度経度を正確に対応付けることができない。そこで、衛星画像における雲のない領域から読み取った海岸線などの情報をもとに画像を緯度・経度の方向に調整することで位置ずれの補正を行っている。

(2)日射変換モデル

衛星画像のアルベド値から地面の日射量への変換はファジィモデルを用いて行っている(図 5)。ファジィモデルは過去の実績データをもとに衛星画像のアルベド値と実際に日射計を使って観測した地面の日射量との相関関係を学習させている。

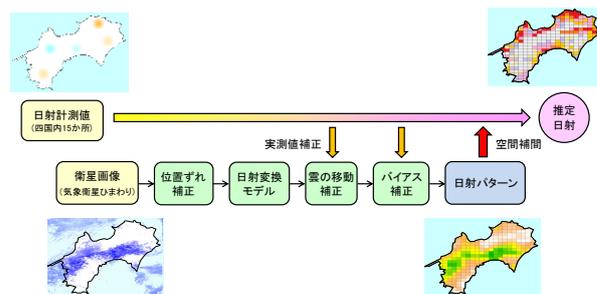


図 4 日射分布の把握

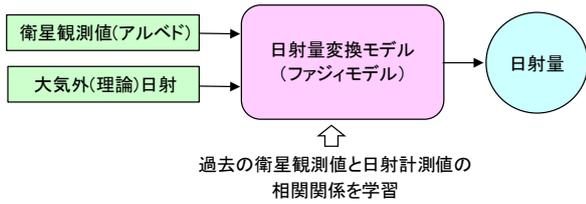
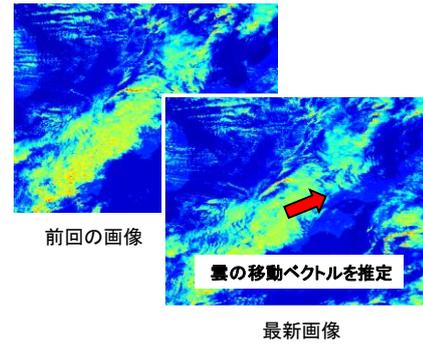


図5 日射量への変換



(3)雲の移動補正

衛星画像(日本領域)の観測間隔は30分もしくは(時間帯によっては)1時間間隔であり、データが配信されるまでの時間遅れもあるために、現在時刻の雲の状態を推定しようとする少なくとも30分程度、時間帯によっては1時間以上に観測した衛星画像を使わなければならない。

そこで、雲の移動を考慮するために、至近の衛星画像と最新の日射計測値から雲の移動ベクトルを推定し、衛星画像推定日射のパターンを緯度・経度の方向に補正する手法を開発した(図6)。

雲の移動ベクトルの推定は気象衛星センター等が実施している大気追跡風の算出¹²⁾に相当する計算を領域を限定するなどして簡易的に行うもので実際の衛星画像の雲の動きを基に推定することで精度向上を図っている。

なお、本手法は見方を変えると最新の衛星画像から1時間以上先の雲の状態を予測する手法と等価であることから、PV出力実績推定システムで開発したこのロジックを後述するPV出力予測システムの衛星画像予測にそのまま適用している。

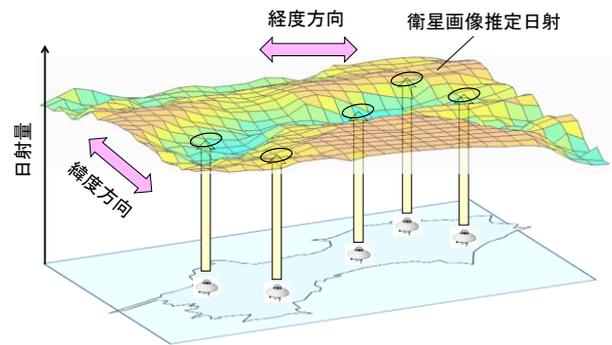


図6 雲の移動補正

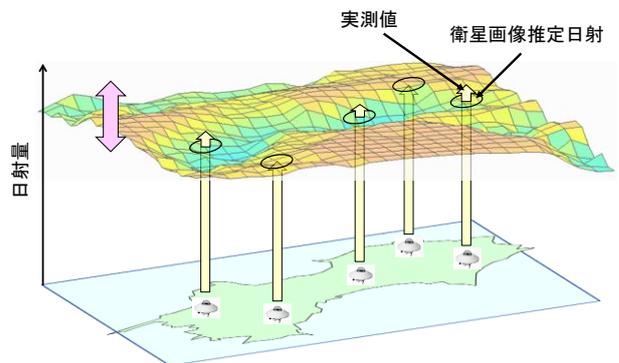


図7 衛星画像推定日射のバイアス補正

(4)バイアス補正

衛星画像のアルベド値から地面の日射量への変換はファジィモデルを使って行っているが、ファジィモデルだけでは時々刻々変化するエアロゾルなどの大気の状態を十分に考慮することができない。また、衛星画像自体にもいくらかの観測誤差が内在している場合がある。そこで、四国内15か所の日射計測値を用いて衛星画像推定日射を補正する手法を開発した(図7)。

図7の上向きの矢印の高さが各地点で観測した日射計測値(実際には15か所、ここでは5か所を表示)であるとすると、日射計測地点における衛星画像推定日射は日射計測値に一致するのが理想であるが、常にそのようになるわけではない。そこで、日射計測地点における誤差の総和がゼロと

なるように衛星画像推定日射を日射量の方向に微調整する。

図8にバイアス補正における推定精度の比較を示す。白抜きのプロットがバイアス補正なしの場合の地点別の推定誤差(RMSE)で 110W/m^2 前後の値であった。これに対してバイアス補正を行った場合の推定誤差は $50\sim 70\text{W/m}^2$ 程度まで改善されている。実際のバイアス補正は15地点全ての日射計測値を用いるが、ここでは14か所の日射計測値を用いてバイアス補正を行い、バイアス補正に用いなかった地点の推定誤差を評価する交差検証により地点別の推定精度を評価した。

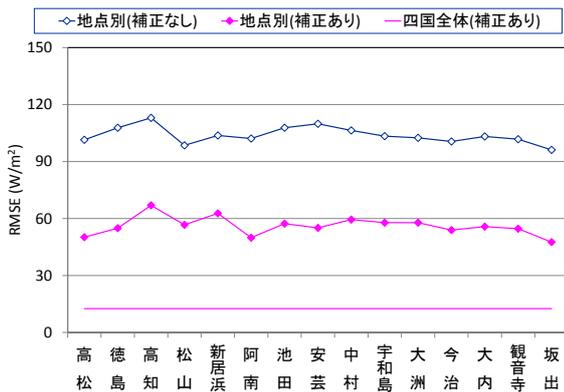


図 8 日射量の推定誤差 (30 分平均値)

また、PV の導入実績に基づいて地点別の重みを設定し、実測値とバイアス補正を行った場合の推定値 (共に地点別の時系列データ) のそれぞれについて時間断面毎に地点別の重みをかけた加重平均値を求め、これを四国全体の平均日射として評価した結果、ならし効果等により推定誤差(RMSE)は 10 数 W/m² 程度まで低減できることが分かった。

個々の 5km メッシュ単位の日射量の推定精度向上は非常に重要であり、日射変換モデルの開発にも力を入れているが、推定誤差をゼロにできないのも現実である。一方、我々の指向しているシステムは電力会社の需給運用への活用を前提としており、電力会社トータルの出力を求めることを主目的としている。このため、個々のメッシュにおいてどうしても取りきれない推定誤差が若干残ったとしても、その誤差をできるだけ正負(±)に分散させる、即ち、あるメッシュで若干多めの推定がなされたとしても近傍のメッシュで若干少なめの推定となるように調整することで、電力会社トータルの推定精度を向上させることが可能になると考えられる。これを実現する手法がバイアス補正である。

(5)空間補間

気象条件によっては日射計測を行っているメッシュの値(日射計測値)と日射計測を行っていないメッシュの値(衛星画像推定日射)の間で段差が生じる場合がある。本手法では日射計測値を正としているため、日射計測値と相関があると考えられる日射計測メッシュ周辺の衛星画像推定日射を日射計測メッシュからの距離に反比例した重みを用

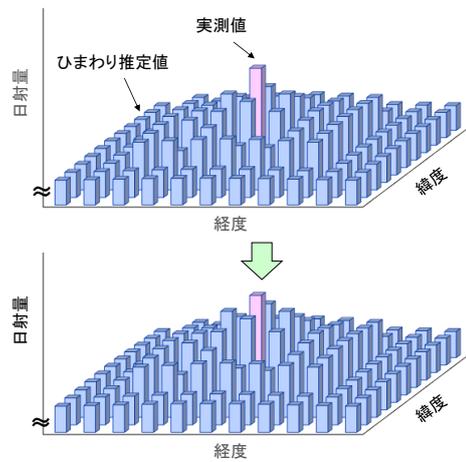
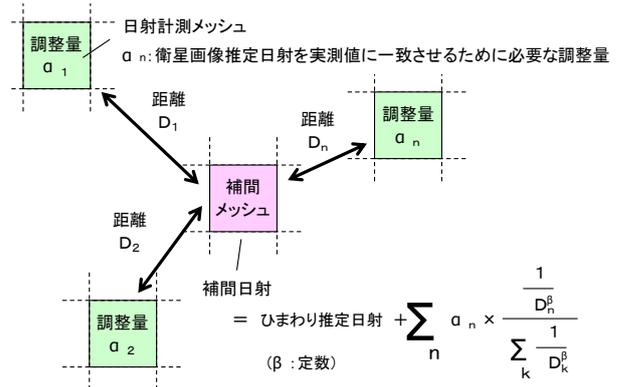


図 9 日射量の空間補間

いて微調整することにより不適切な変動が発生しないように調整している(図9)。

3.2 PV 出力への変換

後半部分の推定日射から PV 出力への変換手法の詳細を図 10 に示す。5km メッシュ毎に水平面推定日射と PV の設備容量等を掛け合わせて PV の出力を求めることを基本とするが、PV パネルの設置状況や自家消費の違いなどを考慮するために、低圧連系 10kW 未満、低圧連系 10kW 以上、高圧連系の 3 つに分けて変換する。

それぞれの連系種別毎に、PV パネルの設置状況として、方位角を東・南・西の 3 通り、傾斜角を 10・20・30 度の 3 通りの合計 9 パターンに分類してそれぞれの設置割合を設定し、この割合に応じて水平面の推定日射を傾斜面の平均日射に変換している^{13)~15)}。設置割合は全メッシュ共通としているが、公開されている統計資料や論文等¹⁶⁾を参考に初期値を設定し、システム全体のチューニングや精度検証の段階で最終調整を行った。

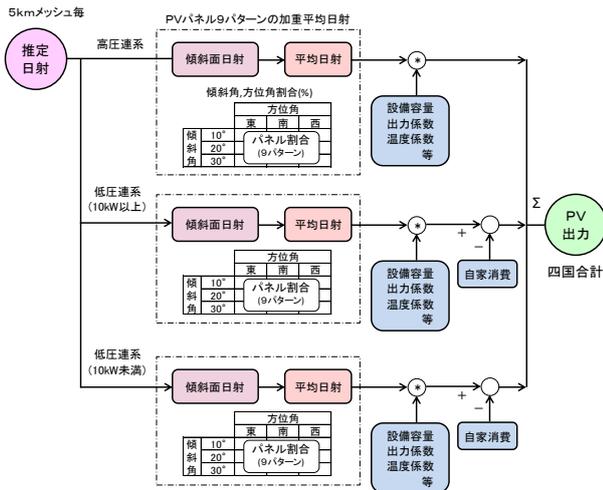


図 10 PV 出力への変換

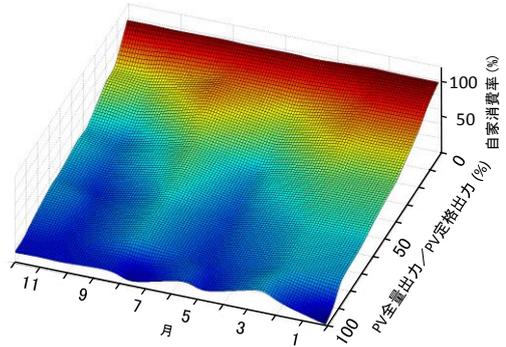
メッシュ毎の平均日射に PV の設備容量や出力係数、温度補正係数などを掛け合わせて PV の全量出力を求め、低压連系については自家消費を差し引くことで余剰電力に換算する。

このうち、PV の設備容量についてはパネル容量よりも PCS 容量の方が小さいシステムが増加傾向にあることが分かった。そこで、これらの影響も考慮できるようにパネル容量と PCS 容量の両方の値を使用し、パネル容量を基に計算した PV 出力に対して、PCS 容量を基に整定した上限値を使って制約を掛けることで、PCS 容量とパネル容量の両方を考慮できるロジックを開発し、現在検証を進めている。また、PV パネルの温度を推定するために必要な気温や風速等は気象庁の数値予報の最新値を用いている。

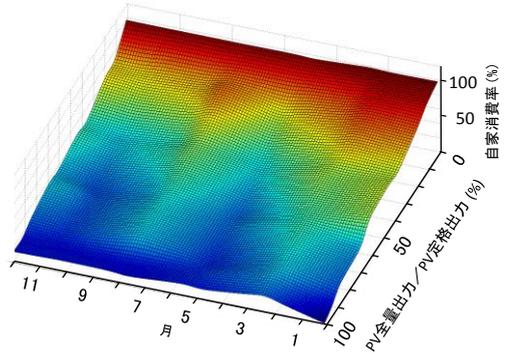
自家消費については、低压連系 10kW 以上は研究段階のチューニングにおいて実績値との対比から固定価格買取制度開始前の余剰買取残置分が幾らかあると判断されたことから初期値として数%を見込んだが、現在は全てが全量買い取りであるため、導入実績に合わせて適切な値に調整している。

一方、低压連系 10kW 未満については、H23 年から 3 年間の四国内のロードサーベイデータを基に自家消費モデルを構築した(図 11)。モデルは平日(月～金)と休日(土、日)に分けており、月別に作成したモデルを滑らかにつなぎ合わせることで年間の自家消費モデルとしている。

最後に、5km メッシュ毎、連系種別毎に求めた PV 出力を全て足し合わせることで電力会社トータルの PV 出力としている。



(a) 平日(月～金)



(b) 休日(土、日)

図 11 自家消費モデル

3.3 推定精度の評価

電力会社トータルの PV 出力については時系列の実績値がないことから、唯一実績値のある電力会社の PV 購入電力量(月量)を用いて推定精度の評価を行った。

PV 購入電力量は低压連系 10kW 未満については電力会社の検針員が各家庭等を巡回して電力メータの検針を行っている。図 12-(a)に H26 年の 5 月から 6 月にかけての低压連系 10kW 未満の PV 出力実績推定値の日量を示す。5 月は比較的天気良かったために日量の大きい日が多かったが、6 月になると梅雨などの影響により日量が少ない日が多くなっている。

1 日単位で前 30 日間の日量の積算値を計算すると同図(b)のようになり、同じ PV でも 6 月 1 日に検針すると検針値は大きくなるが、6 月 30 日に検針すると検針値は小さくなるなど、検針日によって検針値が大きく変化することが分かる。

長い期間の電力量を評価する場合には検針日ずれの影響はほとんどなくなるが、月別などの短期間の評価では、期間中に天候が大きく変化するような場合、検針日ずれの影響が無視できなくなることがある。このため、同図(b)に示すように 6 月

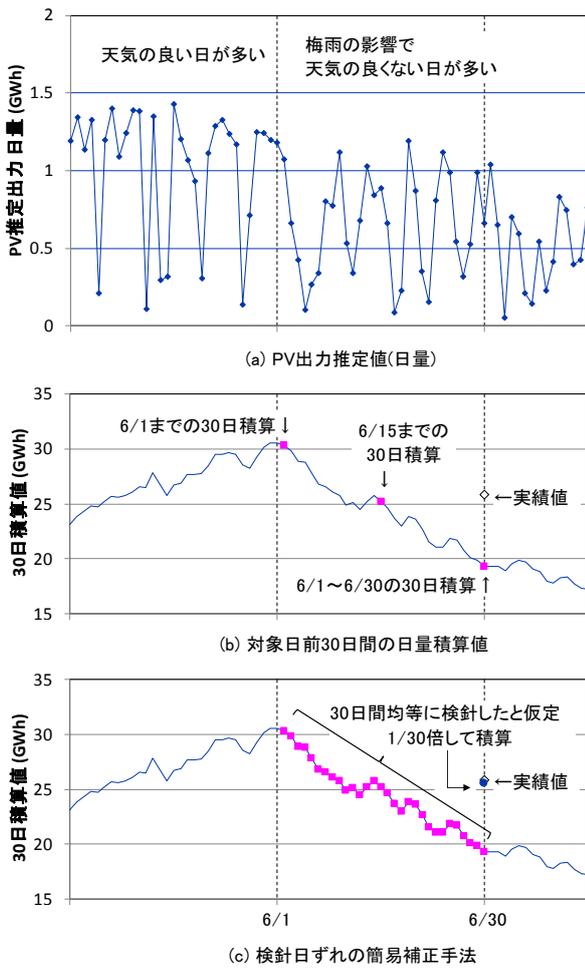


図 12 検針日ずれの補正

の実績値（PV 購入電力量）と PV 出力実績推定値の 6 月 1 日から 6 月 30 日までの積算値を比較すると比較的大きな差が生じている。

電力メータの検針は多くの検針員が広い電力会社管内をほぼ 1 か月かけて順番に検針していることから、休日など検針のない日があるものの押し並べて考えると日々平均して検針を行っていると考えられる。

そこで、毎日全体の 30 分の 1 の PV について検針を行ったと仮定して、前 30 日間の日量積算値を $1/30$ 倍しながら 30 日間積算して PV 出力実績推定値の月量を計算した結果、同図(c)に示すように実績値と良く一致する結果が得られた。

このような方法で検針日ずれの補正を行った上で、月量を評価した結果を図 13 に示す。月別に見ると多少誤差の大きい月もあるものの、期間全体で見た場合の PV 出力実績推定値の誤差は実績値の 2% 程度であることが確認できた。

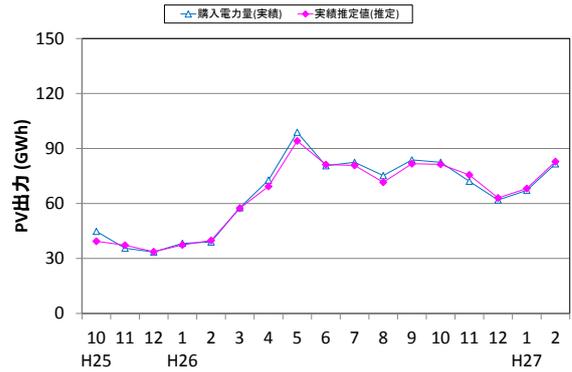


図 13 実績推定精度の評価

電力会社トータルの PV 出力については時系列の実測値がないことから、可能な限り信頼性の高い手法を活用して丁寧に算定する必要がある。月量ではあるもののこのような高い精度で推定できたのは日射計測値を最大限活用したことなどによる推定精度の向上が貢献していると考えられる。

本システムは推定精度の面で不利ではあるが、必ずしも日射計測値を使わなくても PV 出力実績の推定計算を行うことができる。このため、後で述べる実運用システムでは、仮に日射計測値が途絶えた場合には衛星画像のみを用いて推定計算を継続し、衛星画像が長時間にわたって途絶えた場合には日射計測値のみを用いた日射量の空間補間により推定計算を継続する仕組みを導入している。

今後、PV 出力実績推定システムの実運用を通して信頼できる PV の出力実績が十分蓄積できれば、次のステップとして日射計測値を使わなくても同様の精度が得られる手法の開発やシステムの移行も可能と考えている。

また、衛星画像の解像度が 1.5km なのに対して、本システムでは日射量推定のメッシュサイズを 5km としているが、これは衛星画像に位置ずれ補正や雲の移動補正を適用しても常時 1.5km の精度で画素と地面の緯度・経度を対応付けるのが容易ではないこと、個々の PV 出力ではなく電力会社トータルの PV 出力の推定を指向していること、後で述べる気象庁の数値予報(MSM)のメッシュが 5km であることなどに基づいて設定した。

ひまわり 8 号では観測精度が格段に向上していることから、位置ずれ補正などの高精度化を図ったうえでメッシュを細分化することで大規模 PV 発電所など個別の PV への対応も可能であると考えられる。

4. PV 出力予測システム

PV 出力予測手法の概要を図 14 に示す。PV 出力実績推定手法と同様に四国内 5km メッシュの日射量を予測する前半部と 5km メッシュの日射量から PV 出力に変換する後半部の 2 つに大きく分けることができる。

このうち前半部の日射量の予測は、今回新たに開発した気象庁の数値予報を使う手法（①数値予報予測）と PV 出力実績推定システムで実用化済みの衛星画像を使う手法（②衛星画像予測）を併用するハイブリッド方式を特徴としている。

後半部の PV 出力への変換は基本的に PV 出力実績推定システムで実用化した手法と同じであるが、特高メガソーラについては発電所毎に出力を求める方式を新たに開発した。

4.1 日射分布の予測

四国内 5km メッシュの日射分布を予測するための数値予報予測と衛星画像予測の手法はそれぞれ以下のような特徴を有している。

①数値予報予測

[手法] 気象庁の数値予報 (LFM、MSM、GSM) の雲量、湿度、気温、降水量の値を用いて、ファジィモデルにより日射量を予測する。ファジィモデルは過去の実績データに基づき数値予報の値と実測日射の相関関係を学習させている。なお、LFM は予測精度の向上というよりは 30 分間隔の予測値を求めるために使用している。

[長所] 数値予報は気象モデルを使った物理シミュレーションであるため、最大 11 日程度先までの長時間の予測が可能である。

[短所] 気象庁の数値予報モデルにアメダス等の実績値が取り込まれ、予報計算が行われて結果が配信されるまでに時間を要することなどにより、気象の変化が激しく予報が難しい場合などは、数値予報が手元に届いた時点で最新の予報値に比較的大きな誤差が含まれる場合がある。

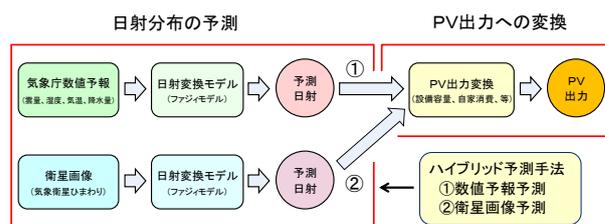


図 14 PV 出力予測手法の概要

②衛星画像予測

[手法] 衛星画像を用いて雲の移動を考慮しながら日射量を予測する。H26 年 10 月に実運用を開始した PV 出力実績推定システムで開発した雲の移動補正の手法を活用している。

[長所] 気象衛星は実際に雲などの状態を観測していることから、数値予報の初期値と比べて前線の位置や雲の広がりなど、最新かつ比較的正確な日射の状況とトレンドの把握が可能である。

[短所] 雲の移動のみによる予測であり、形状変化等は十分には考慮できないため、数時間先までの予測が限界である。

本システムでは①数値予報予測の日射量を基本的に採用するが、最新の数値予報において大きな誤差があると判断した場合には最新の時間断面において正確な値を有している②衛星画像予測に切り替えることで、短時間先の予測精度の低下を防いでいる。

このため衛星画像予測への切り替えは数値予報予測では大外しの可能性が大きいと判断した場合に限定される。これは平常時の短時間先予測は後述の実績値補正の効果が大きいため、数値予報予測でも衛星画像予測でも予測精度に大きな違いが見られなかったためである。また、誤差が大きいと判断した数値予報予測値は捨て、あえて両予測値を常に併用することは行っていない。

4.2 PV 出力への変換

後半部の予測日射から PV 出力への変換手法の詳細を図 15 に示す。低圧連系 10kW 未満、低圧連系 10kW 以上、高圧連系については PV 出力実績

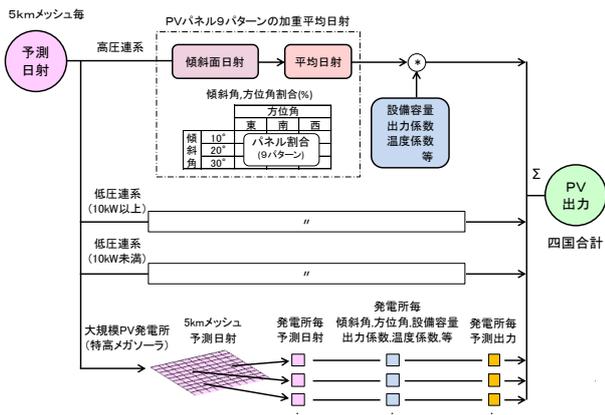


図 15 PV 出力への変換

推定システムで既に実用化済みのロジックをそのまま採用した。

特高メガソーラについては発電実績を収集していることから PV 出力実績推定システムでは計算を行っていないため、出力予測用に新たに開発した。特高メガソーラは規模が大きく、地点数もある程度限定されることから発電所毎に設備容量（パネル容量より PCS 容量の方が小さい発電所が多い）やパネルの角度、出力係数などの定数を実態に合わせて設定し、発電所毎の出力を求めるロジックとしている。

PV 出力への変換後、最新の出力実績値を用いて補正を行うことで短時間先の予測精度向上を図っている(図 16)。実績値補正は最新の予測値と実績値の誤差を求め、これに重み係数を掛けた値を使って将来の予測値を微調整する単純な手法で、重み係数は過去実績を基に予測誤差が最小になるように整定している。

図 17 に予測時間と年間の予測誤差の関係を示す。実績補正を行わない場合の数値予報予測は初期値(0時間先)でもある程度大きな誤差が含まれているが、衛星画像予測は初期値として推定実績を用いているために短時間先の予測精度は衛星画像予測の方が良好な結果となる¹⁷⁾。このようなことから、一般的には予測精度が逆転する時間(Ts)で予測手法を切り替えて使用することが考えられている。

本システムでは実績補正を行うことで数値予報予測の初期値の誤差は衛星画像予測と同一となるため、短時間先の予測精度は衛星画像予測と同程度となることが確認できた。本システムが基本的

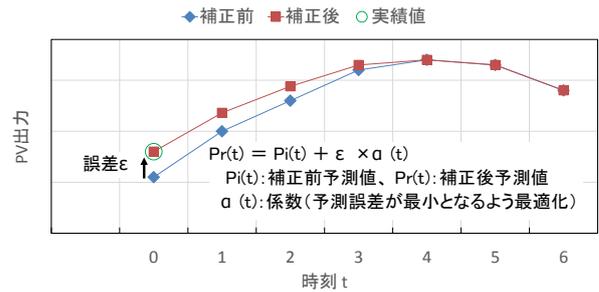


図 16 PV 出力予測値の実績値補正

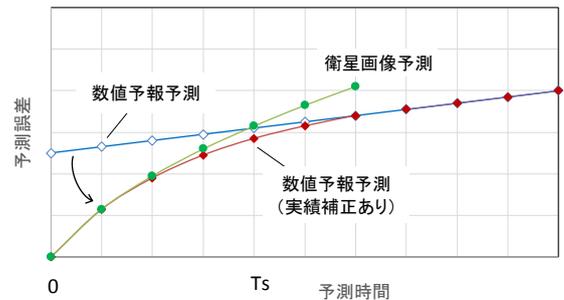
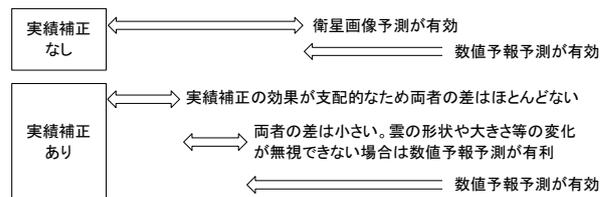


図 17 実績値補正の効果

に数値予報予測を用いるのはこのような理由からである。

4.3 予測精度の評価

H26年1月から12月までの1年間についてPV出力の比較的大きい10時から14時の時間帯の予測値を絶対平均誤差(MAE)と二乗平均平方根誤差(RMSE)を使って評価した。

数値予報は局地モデル(LFM)、メソモデル(MSM)、全球モデル(GSM)の3種類を用い、毎正時の時点において気象協会から受信済みのデータのうち、予測対象時刻における最新データを使用することとした(図 18)。例えば、0時の予測計算は前日の23時台に受信した LFM(実質7時間先まで)と MSM(8~36時間先まで)、前日の18時台に受信した GSM、前日の3時台に受信した GSM が対象となるが、数値予報が更新されない37時間先以降は前回までに計算した予測結果をそのまま用いている。

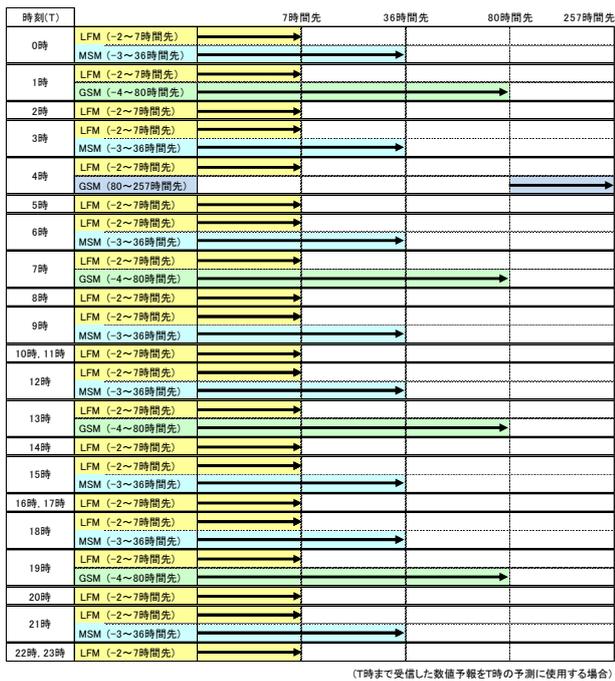


図 18 予測時刻と数値予報の取り込みタイミング
(数値予報は気象協会経由で受信)

図 19 に 24 時間先の予測誤差と PV の設備容量を同一スケールで示す。設備容量に対して予測誤差は何れの月もかなり小さくなっており、最も大きな月でも設備容量の 10%程度であることが確認できた。

評価を行った 1 年間に PV の設備容量が 60 万 kW 程度から 100 万 kW 近くまで大きく増加したことから、PV の設備容量に対する比率で予測誤差と予測時間（何時間先を予測したか）の関係を評価した結果を図 20 に示す。MAE（括弧内は RMSE）は 1 時間先で 3.9% (5.3%)、24 時間先で 8.7% (11.5%)、48 時間先で 10.0% (13.0)と国内外で開発されている同様の PV 出力予測システムと遜色ないレベルであることが確認できた。

なお、本予測手法は気象庁の数値予報への依存度が高いことから、数値予報が外れた場合には PV 出力予測の精度も悪化する傾向が見られた。

5. 実運用システム

PV 出力実績推定手法と PV 出力予測手法の全体構成を図 21 に示す。これら 2 つの手法を組み込んだ実運用システムを構築したが、引き続き予測精度向上等の研究を継続していることもあり予測システムは四国総研に設置し、風力出力予測システ

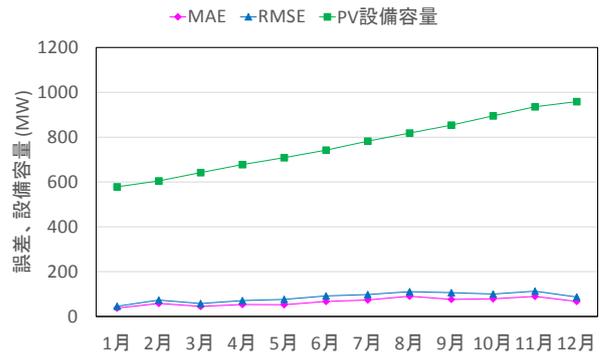


図 19 月別の予測誤差(24 時間先,10 時~14 時)

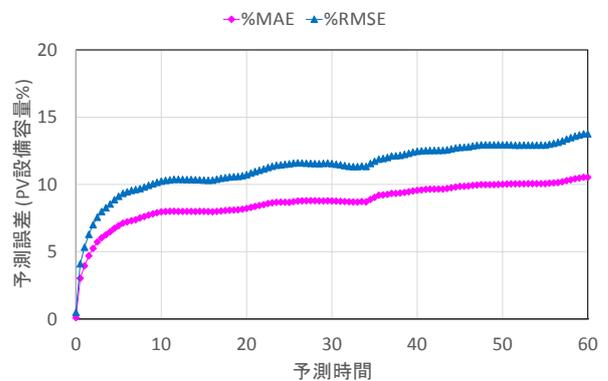


図 20 予測時間と予測誤差(10 時~14 時)

ム（H22 年に実運用開始）と一体で運用している（図 22）。

本手法は演算処理が非常に軽いため、実運用システムは 10 万円クラスの OA 用パソコン（PC）と MS-Windows 7 で構築している。但し、給電設備に相当する重要機器であることから十分な信頼性を確保する必要があり、PV 出力実績推定システムと PV 出力予測システムのそれぞれを運用系と待機系、試験系の 3 系列で構成し、計 6 台の PC で運用している。その他、数値予報等受信用 PC と保守メール送信用 PC は風力出力予測システムと共用している。

常時は運用系と待機系、試験系の 3 台の PC は同一の計算を行っており、運用系のみが四電中給へのデータ配信を担当しているが、待機系は運用系の動作状況を常に監視しており、運用系に異常が発生した場合には自動で待機系に切り替わる仕組みとなっている。

試験系は PV の設備容量マップの更新(毎月 1 回)や、プログラムの改良等の際に試験・検証用とし

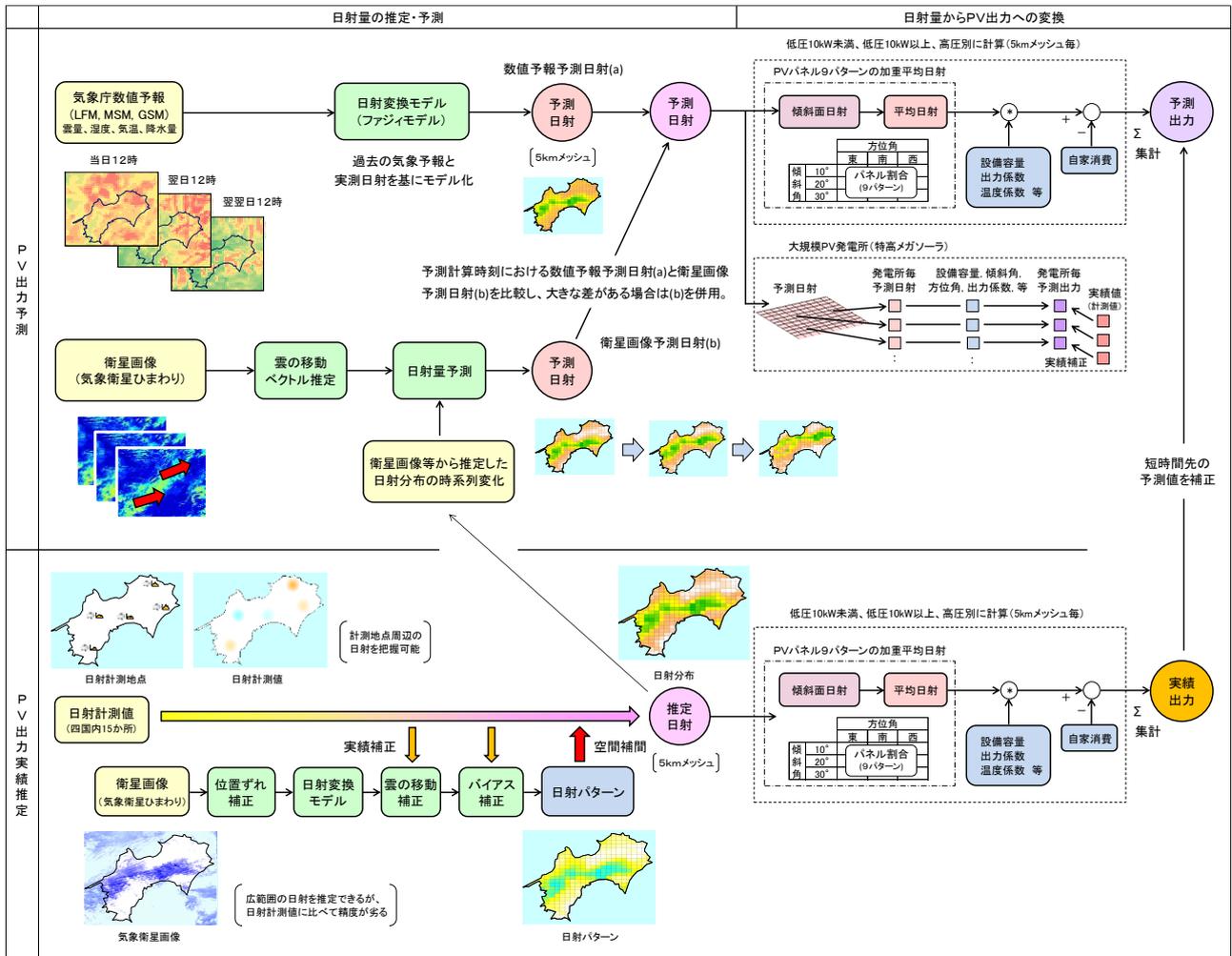


図 21 PV 出力実績推定・予測システムの全体フロー

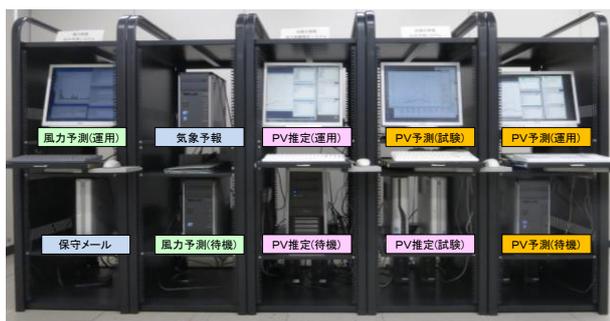


図 22 予測システムの外観

で使っているが、マウスによるボタン操作でモードを切り替えることで運用系として動作させることも可能である。

システムの動作状況は携帯メールを使ってシステム管理者に通知しており、万一異常が発生した場合にも迅速な対応が取れる体制を構築している

が、幸いにもこれまでに大きなトラブル事例は発生していない。

予測システムと四電中給システムとの間のデータの流れを図 23 に示す。予測システムは四電中給で収集した日射計測値や PV 出力等の実績値をネットワーク経由で参照するとともに、気象庁の数値予報や衛星画像データを気象協会から受信し、PV の出力実績推定および出力予測の計算を行った後、演算結果を四電中給に配信している。

データの更新間隔は PV 出力実績推定値が 1 分、PV 出力予測値が 30 分としている。四電中給では受信したデータに基づき、実績値や予測値を当直員の指令卓のディスプレイにグラフ形式や表形式で表示するとともに、計画システムにも転送して電力の需給運用に活用している。

予測結果の表示画面の一例を図 24 に示す。画面表示は要望に応じて作り込みが可能であるが、こ

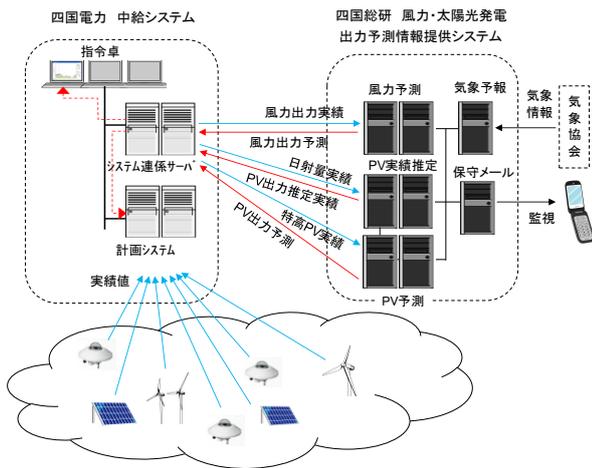
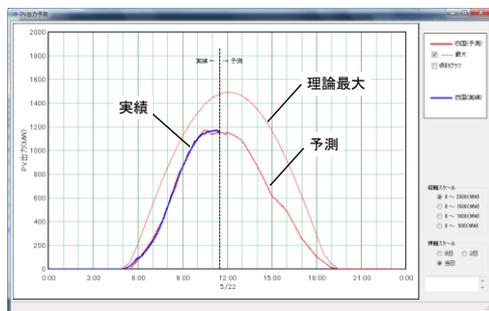
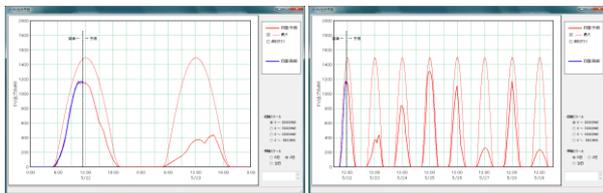


図 23 予測システムのデータの流れ



(a) 当日表示



(b) 当日・翌日表示

(c) 8日間表示

図 24 予測結果の画面表示の一例

ここでは四国総研側の画面を載せている。予測値と一緒に現在時刻以前は実績値を表示するとともに、四国全体が快晴と仮定した場合の理論最大値も併せて表示することで PV の発電出力レベルを分かりやすくしている。

弊社では 6 年前に実運用を開始した風力出力予測システムの開発にあたり、パソコンレベルで実行可能な安価なシステムの実現をめざし研究開発を進めた。その結果、パソコン上動作するにも関わらず、当時主流であった高価な計算機システムを駆使した手法と同程度の精度を有する予測システムの開発に成功した。

今回開発した PV 出力予測システムでもこの方針を踏襲しており、演算時間は気象予報や衛星画像のバイナリ形式から CSV 形式への展開を除き（フォーマットにより時間が異なるため）、1 分間隔で実行する PV 出力実績推定計算が 1 秒程度、1 時間間隔で実行する LFM を使った 7 時間先までの PV 出力予測計算が 30 秒程度、30 分間隔で実行する PV 出力予測の実績補正計算が瞬時であるなど非常に軽いシステムとなっている。また、プログラム自体も小さく、USB メモリー等にデータと一緒に入れておけば、インストールの必要もなく任意の PC で試用することが可能である。もちろんネットワーク経由で数値予報等のデータを参照することができれば実運用システムと同一の計算を行うことも可能である。

このように本手法は処理が非常に軽く他のプロセスへの負担が少ないことや電力の自由化が進む中で出力予測の重要性がますます増大すると考えられることから、PV 出力実績推定、PV 出力予測、風力出力予測の 3 つのプログラムを四電中給のサーバ用に移植し、サーバ上で直接実行することにより一層の信頼性向上を図る計画としており、現在その作業を進めているところである。

6. まとめ

四国電力の中給電指令所において実運用を開始した PV 出力実績推定システムと PV 出力予測システムの概要を紹介した。

今後、実運用結果も踏まえながら更なる推定・予測精度の向上を図るとともに、出力予測における信頼区間の設定などシステムの高度化について研究を進める予定である。

【謝辞】

本研究は、弊社の自主研究に引き続き、四国電力(株)系統運用部より委託を受けて実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 瀧川他：“ファジィ回帰を用いた太陽光発電出力予測の一検討”，電気学会電力・エネルギー部門大会，101（2011）

- 2) 瀧川：“日射量推定のための気象衛星ひまわり画像の位置精度に関する一考察”，電気学会全国大会，6-017（2012）
- 3) 瀧川：“補間を用いた日射強度分布の推定についての一考察”，電気学会電力・エネルギー部門大会，231（2013）
- 4) 瀧川：“衛星画像を用いた地域トータルの太陽光発電出力推定の一検討”，太陽エネルギー学会，111（2013）
- 5) 瀧川：“風力発電および太陽光発電の出力予測システムの開発”，電気学会電子・情報・システム部門大会，05-9-7（2014）
- 6) 瀧川：“ICT を活用した風力・太陽光発電出力予測システムの開発”，電力技術懇談会講演会（2014）
- 7) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定システムの開発”，四国電力，四国総合研究所 研究期報 101（2014）
- 8) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定精度の一評価”，6-074，電気学会全国大会（2015/3）
- 9) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定結果に関する一考察”，227，電気学会 B 部門大会（2015/8）
- 10) 瀧川：“太陽光発電出力予測システムの開発”，太陽エネルギー学会（2015/11）
- 11) 瀧川：“太陽光発電出力予測システムの開発”，新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同，FTE-16-008，MES-16-008（2016/2）
- 12) 林，下地：“大気追跡風算出アルゴリズム”，気象衛星センター技術報告 第 58 号（2013/2）
- 13) JIS：“太陽光発電システムの発電電力量推定方法”，C8907（2005）
- 14) 松川，山田，塩谷，黒川：“多面アレイ構造太陽光発電システムに対応したシミュレーションの開発”，電学論 B，Vol. 124，No.3 P 447-454（2004）
- 15) NEDO：“太陽光発電システム共通基盤技術研究開発報告書”（2007）
- 16) 大関，Joao，高島，荻本：“太陽光発電システムの代表的な発電量データセットに関する検討”，電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会，FTE-11-029，MES-11-015（2011）
- 17) Richard Perez et. al：“Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US”，Solar Energy, in press（2010）

リチウムイオン電池加速劣化試験結果について

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： リチウムイオン電池
加速劣化試験

S O C
放電容量
内部抵抗

Key Words : Lithium Ion Battery
Accelerated deterioration
test
SOC(State Of Charge)
Service capacity
Internal resistance

Result of the accelerated deterioration test of LIB

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.

Yasunobu Tada

Abstract

Because batteries are very expensive, it is necessary for the life extension to limit the operational range.

We tested the effect of the limited SOC range, the effect of the frequent change of current value and large charge and discharge current. The limited SOC range was effective in the life extension, the frequent change of current value and large current value wasn't effective.

The service capacity of battery gradually reduced, the internal resistance gradually increased especially at a low temperature.

The more the SOC range was limited, the more the life of battery was extended, but the more expensive the cost of battery was. The best SOC range existed, but we couldn't find it.

1. はじめに

再生可能エネルギー発電の増加に伴い、電力需給調整用の蓄電池の必要性が増している。蓄電池は運用性に優れるが非常に高価であり、寿命がそれほど長くない使い方によっては寿命が短くなると言われている。

そこで、運用に悪影響を及ぼさない範囲で極力寿命を長くする運用を行うことが望まれる。蓄電池の実運用において、寿命に影響を与える項目として下記が考えられる。

- ・蓄電池周囲温度
- ・蓄電池充電深度（運用SOC範囲）
- ・充放電電流の大きさ・変動

このうち、蓄電池周囲温度に関しては電力中央研究所における試験^{1) 2)}で、40℃以上で寿命が短くなることが指摘されている。充電深度、充放電電流の大きさ・変動に関しては同試験では明確でないため、四国総合研究所で試験を行うこととした。

2. 試験方法

2.1 試験ケース

試験には電力中央研究所と同じリチウムイオン電池単セル（20Ah）を使用した。なお、この蓄電池のメーカ推奨SOC範囲は15%～85%である。

一般的に蓄電池寿命に影響の少ないとされる充電深度（SOC範囲20%～80%）で充放電するケースを基準ケースとして、下記の3ケースで、充放電を繰り返すことで実施した。

- ・ケース1
充電深度を大きくしたケース
SOC範囲0%～100%
充放電電流は変えない（1C）
- ・ケース2
充電深度は変えず充放電電流を大きくかつ変動させたケース
SOC範囲20%～80%
充放電流を基準ケースの2倍の方形波とする
充放電電流値2C
デューティー50%（平均電流値は1Cと同じ）
- ・ケース3
基準ケース
SOC範囲20%～80%
充放電電流値1C
それぞれのケースの充放電電流の大きさ、SOCの変化を図-1～3に示す。

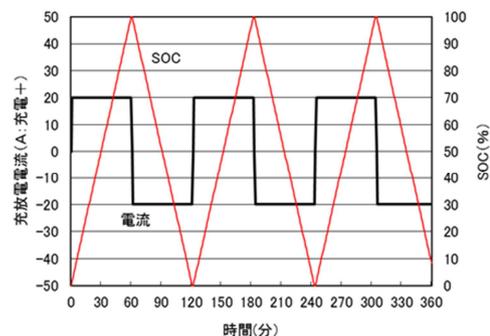


図-1 ケース1（充放電深度大）
充放電パターン

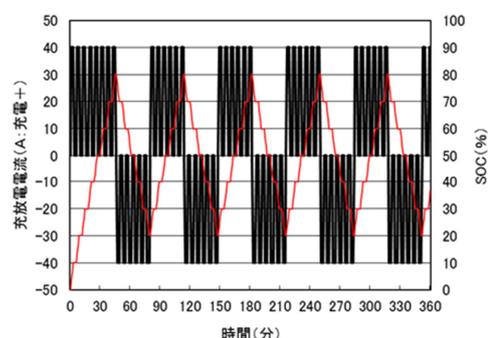


図-2 ケース2（電流・電流変動大）
充放電パターン

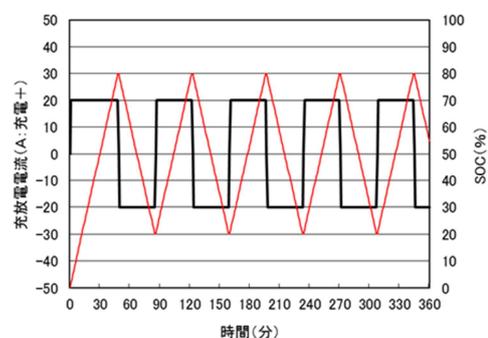


図-3 ケース3（基準）
充放電パターン

2.2 SOC規定方法

SOC範囲の規定方法としては、SOCを充放電電圧（OCVは測定に時間がかかるため利用できない）で制限する方法と、電流積算値で制限する方法がある。運用上簡単なのは充放電電圧で制限する方法なので、これを採用する。1C充放電におけるSOCと電池電圧の関係を図-4に、各SOC時の充放電電圧を表-1に示す。これより、充電の制限SOC80%は充電電圧2.45V、放電の制限SOC20%は放電電圧2.

1.1Vに相当する。電圧制限では充電を定電流定電圧（CCCV）とするとSOCを規定できない（余分に充電される）ため、定電流（CC）充放電とする。

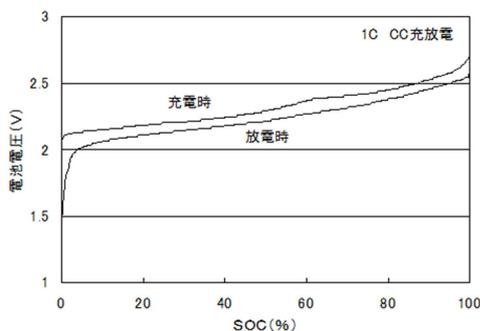


図-4 SOCと電池電圧の関係

表-1 各SOC時の充放電電圧

SOC	充電時	放電時
0%	2.05	1.5
10%	2.15	2.06
20%	2.18	2.11
80%	2.45	2.38
90%	2.53	2.46
100%	2.7	2.58

2.3 測定内容

新品時および充放電を3000時間繰り返した後、放電容量および内部抵抗値の測定を行った。測定温度は、新品時および12000時間後は-5℃、10℃、25℃、40℃の4点、3000時間後、6000時間後、9000時間後は-5℃、25℃の2点とした。

放電容量測定は定電流充放電とし、0.2C電流で充電し規定電圧（表-1）に達すれば充電停止、0.2C電流で放電し、規定電圧に達すれば放電停止とした。

内部抵抗測定はJIS法とし、0.2C放電時の電圧・電流と1C放電開始10秒後の電圧・電流値の差異から求めた。

蓄電池充放電装置は、自社で設計・製作した装置³⁾を使用した。

3. 試験結果

3.1 電池放電容量・内部抵抗値の変化

先の充放電パターンで充放電を繰り返し、3000時間毎に-5℃、25℃で放電容量、内部抵抗値を測定した結果を図-5～8に示す。いずれも新品時を100%とした相対値で示す。内部抵抗値は放電容量の減少の影響を避けるため、単位容量あたりのコンダク

タンス値で評価した。グラフではコンダクタンス値は減少しているが、抵抗値が増加したと表現する。

充電深度が深いケース1の容量減、抵抗増が目立つ。ケース2およびケース3の放電容量、内部抵抗値はほとんど一致している。これらから、充電深度が経年劣化に大きく影響し、電流の大きさや変動は影響を与えないと考えられる。なお、ケース2の充放電電流実効値は1.41倍（平均値は同じ）であり、その分温度上昇が2℃ほど大きかったが、その影響は見られない。

また、-5℃での値と25℃での値を比較すると、いずれのケースでも-5℃での劣化が大きくなっており、特に-5℃での内部抵抗値は大幅に増加している。また、ケース2、ケース3では25℃の放電容量はほとんど減少していない。これらから、経年により低温時の容量減、内部抵抗増加が進み、特に内部抵抗増加が著しいこと、高温時の放電容量の減少は少ないと考えられる。大型蓄電池の実運用では、電池の高温時の劣化を防ぐため、高温時の冷房運転が行われているが、電池の経年が進んだ状態では、低温時の暖房運転も必要であると考えられる。大型蓄電池の運用では空調機の消費電力の多さが問題になっていることから、暖房用熱源にインバータ排熱の利用などを検討する必要がある。

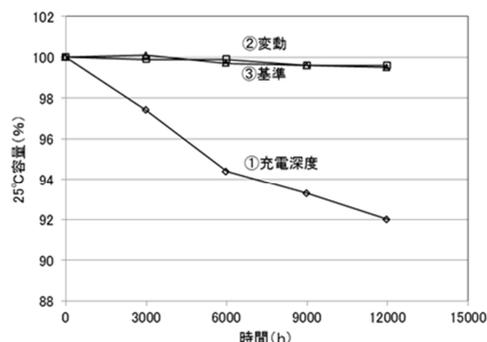


図-5 25℃放電容量の変化

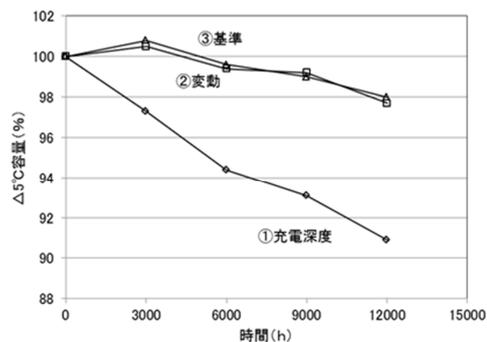


図-6 -5℃放電容量の変化

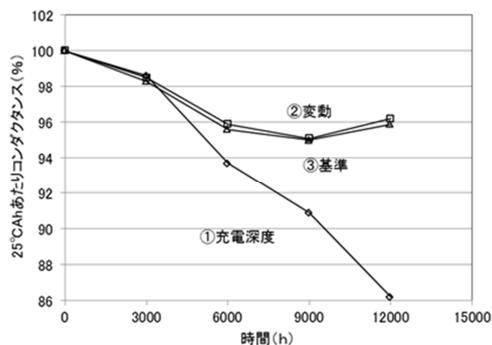


図-7 25°C単位容量あたり
コンダクタンス値の変化

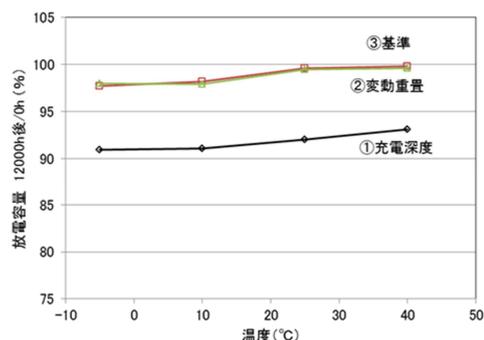


図-9 12000時間後の放電
容量への温度の影響

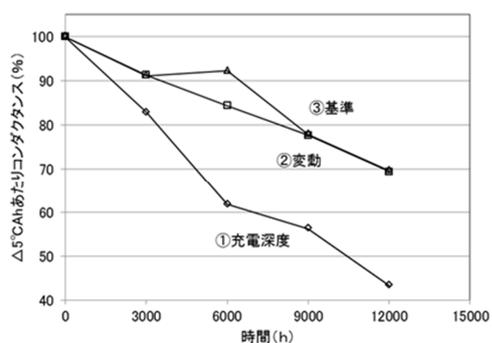


図-8 -5°C単位容量あたり
コンダクタンス値の変化

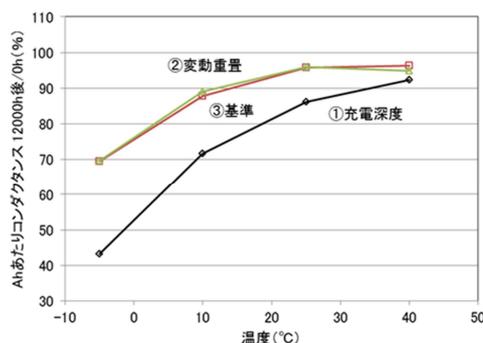


図-10 12000時間後の内部
抵抗への温度の影響

3.2 12000時間後の温度の影響

12000時間後の-5°C、10°C、25°C、40°Cでの放電容量、内部抵抗値測定結果を図-9～10に示す。いずれのケースでも放電容量は温度の影響は比較的なだらかであるが、内部抵抗は温度の低下に伴い急激に増加している（グラフはコンダクタンスのため急激に減少している）。特に充電深度が大きいケースで著しい。

内部抵抗の増加は、大電流充放電時の電圧降下が大きくなり、損失の増加や充放電可能なSOC範囲が制限される。経年電池では、25°C以下の温度領域で内部抵抗の増加による充放電電流の制約が発生する可能性が高く、大電流充放電に対して運用制限が必要と考えられる。

4. 最適な充電深度

充電深度を浅く（運用SOC範囲を狭く）すると電池寿命は延びるが、一方で有効利用できる蓄電池容量は少なくなり、蓄電池コストは充電深度に反比例して高価になる。一方で充電深度を深く（運用SOC範囲を広く）すると電池寿命は短くなるが、一方で有効利用できる蓄電池容量は多くなり、蓄電池コストは安価になる。すなわち、経済的に最適な充電深度が存在することになる。最適な充電深度を求めるためには多くのケースでの実験が必要であり、今回の実験では求めることはできなかった。

5. 今後の取組み

充電深度が寿命に大きく影響することが判明したため、ケース2の電流・電流変動が大きいケースは12000時間で終了とし、充電深度がケース1とケース3の間であるSOC範囲10%～90%の実験を開始した。充放電パターンを図-11に示す。

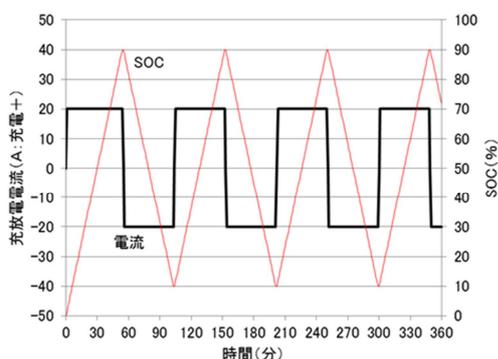


図-1.1 ケース4 (充放電深度中)
充放電パターン

[参考文献]

- 1) 電力中央研究所報告
「定置用リチウムイオン電池の寿命評価方法の開発
(1)」 Q14009 2015年
- 2) 電力中央研究所報告
「定置用リチウムイオン電池の寿命評価方法の開発
(2)」 Q15013 2016年
- 3) 四国電力研究期報 N0100
「リチウムイオン電池特性試験結果について」
2013年

6. まとめ

1種類の電池で、試料数が1で実験ケースも少ないため、断定的なことは言えないが、今回の実験結果のまとめは下記のとおりである。

- ・蓄電池の実運用において、蓄電池充電深度（運用SOC範囲）が寿命に大きな影響を与える。充放電電流の大きさ・変動は影響を与えない。
- ・経年化したリチウムイオン電池では、低温時の特性劣化が著しく、特に内部抵抗の増加が著しい。一方で、高温時の特性劣化は比較的少ない。
- ・高温時の寿命消費を防止するために冷房が必要であるが、あわせて経年化した蓄電池では、低温時の特性劣化を補償するための暖房が必要と考えられる。
- ・充電深度を浅くすると寿命は長くなるが蓄電池コストは高価になるため、経済的に最適な充電深度が存在する。

7. むすび

蓄電池は高価なため、極力寿命消費を減らして長期間使用する必要がある。鉛蓄電池において温度や充電深度が電池寿命に大きく影響することはすでに広く知られているが、リチウムイオン電池においても同様の傾向があることが明らかになった。今後の蓄電池の経済運用の一助になれば幸いである。

[謝辞]

本研究は、四国電力株式会社経営企画部より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

最後に執筆者、編集ならびに審査にあられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研究期報 第104号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 松浦芳彦
株式会社四国総合研究所

発行 株式会社四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
TEL (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp