

インターネット遠隔計測系とバッテリーレス太陽光発電システムに基づく自律的ITファームの研究開発

Development of an Autonomous IT Farm based on Internet Supervisory Sensing and Battery-less Photo voltaic Power Generation Systems

山城博幸*¹ 長田智和*² 本村直樹*³ 金城篤史*² 城間政司*²
 Hiroyuki YAMASHIRO Tomokazu NAGATA Naoki MOTOMURA Atsushi KINJO Tadashi SHIROMA
 新垣秀雄*² 谷口祐治*² 名嘉村盛和*² 玉城史朗*²
 Hideo ARAKAKI Yuji TANIGUCHI Morikazu NAKAMURA Shiro TAMAKI

Abstract

The development of utilizing solar energy is of common concern to all mankind. We developed a photovoltaic power generation system as an independent type power supply for a water irrigation system for agriculture. The common arrangement, where solar energy is finally stored in batteries has various disadvantages.

In this research, to aim for a high increase in efficiency of agricultural production, we develop an autonomous photovoltaic power generation system without batteries to overcome the disadvantage of the usual system, and we construct the internet supervisory remote sensing of the environmental data in the green house by Wireless-LAN and agent system. Furthermore, an automatic water irrigation with water irrigation system based on the amount of required water for the crop was built.

キーワード: 自律的ITファーム, 太陽光発電システム, エージェントシステム, 重回帰分析

Key Words: Autonomous IT farm, Photovoltaic Power Generation System, Wireless-LAN, Agent system, Multiple Linear Regression Analysis

1. はじめに

無尽蔵な自然エネルギーは、化石燃料に代わるクリーンな代替エネルギーとして位置づけられ、エネルギーの安定供給の確保、および地球環境保全の観点から、極めて有効なエネルギーと考えられている。また、自然エネルギーの中でも、最も研究、開発され、実用化に到達している太陽電池をエネルギー供給デバイスとして活用するシステムは家庭用補助発電装置として注目されている [1]。

ところで、わが国唯一の亜熱帯地方である沖縄県の離島各地では、マンゴ、パイン、トロピカルフルーツなどの高付加価値の果樹生産が盛んに行われている。しかし、それらの地域では、果樹生産用の農業用水の確保が深刻な問題となっている。すなわち、商用電源を用いて井戸水の揚水を行うと、その費用は直接、農産物の原価に反映される。さらに、井戸が存在しても商用電源が供給されていない畑地も多く存在する。従って、それに替わる電源システムとしての独立型電源の構築は重要な課題である。この問題を解決するための実証的研究として、我々の研究室では、沖縄県うるま市津堅島において地域の農業生産組合と共同で、風力・太陽光ハイブリッド発電システム(風力 4.5kW, 太陽光 1.6kW)を設置し、井戸水の揚水電源として利用することにより井戸水を灌漑用水として供給した。しかし、ここで構築したシステムでは以下の問題点が生じた[2]。

- 1) 遠隔地に構築された独立型電源システムにおいて、事故やトラブルの防止のための監視システムが必要となる。
- 2) 太陽光発電システムでは、ポンプを駆動するための大容量バッテリー(1,000Ahr)のメンテナンスにかかる作業が大きな負担になる。従って、バッテリーのメンテナンスフリーを実現するシステムが望ましい。
- 3) 温室で高付加価値果樹を生産する場合、作物の品質を管理するためのシステム構築が必要となる。

我々は、上記の問題点を克服するために、まず個々の問題に対する解決策を見出した。以下に、順を追ってこの解決策を列挙する。

- 1) システム監視のための遠隔計測用ネットワークを無線LANを基盤として構築する。無線LANシステムは設置・移動が便利であり、また、20W程度の微小電力で稼動するため、電力供給源として小型太陽電池を利用した小規模バッテリーシステムを導入すればよい。
- 2) 井戸水を直接揚水するためには、その用途に応じて250W-5kW程度の動力が必要となる。バッテリーを使用すると、それ自身が大容量となり、設置場所の確保、および、メンテナンスに膨大な人的コストがかかる。従って、メンテナンスフリーを実現するため、バッテリーレス太陽光発電システムを構築する。このシステムは、日射量(入射エネルギー)に応じてインバータの周波数制御を行うことで、負荷(ポンプ)を駆動する構成である[3]。ここで、井戸水をポンプアップした水源は位置エネルギーとして保存され、必要に応じて散水に使用する。
- 3) バッテリーレス発電システムの遠隔監視や作物の育種管理のための遠隔監視・計測システムを構築するために、

*1 沖縄日立ネットワークシステムズ株式会社

*2 琉球大学情報工学科

*3 沖縄電力株式会社

(原稿受付: 2006年10月4日)

データを自動収集するエージェントシステムを導入する。

ここで、我々は、バッテリーレス発電とバッテリー型発電の役割を以下のように明確にした。すなわち、比較的大きな電力容量であるポンプ(250W～5kW)の電源には、バッテリーレス太陽光発電を用い、小容量(20W～30W)の計測機器や通信機器の電源としては、小型太陽電池によりバッテリーに充電して活用する。我々は、上記3項目の課題を統合化したシステムを『IT ファーム』と名づけ、構成される個々のシステムに関し、順をおって説明する。そして、それを実現するための先行の実証研究として、琉球大学農学部農場にパイロットプラントを設置し、①有線・無線混在型遠隔計測・監視システムを構築し、②自律型バッテリーレス太陽光発電システムを開発し、さらに、③自動散水システムを構築するため、作物の最適要求水分量の推定式をサラダ菜の生育過程で求めた。次章以降は、以上の項目について説明する。

2. 有線・無線混在型ネットワークを用いた IT ファームの構築

本研究では前章に述べた研究項目を実現するべく、統合化システム『IT ファーム』の構築を行った。本システムは、インターネット遠隔計測・制御システム(Internet Telemetry and Control System)、太陽光発電揚水システム(Photovoltaic Water Pumping System)、最適灌漑システム(Water-irrigation System for Optimal Agriculture)の3つのシステムにより構成される。ITファームの全体像を図1に示す。

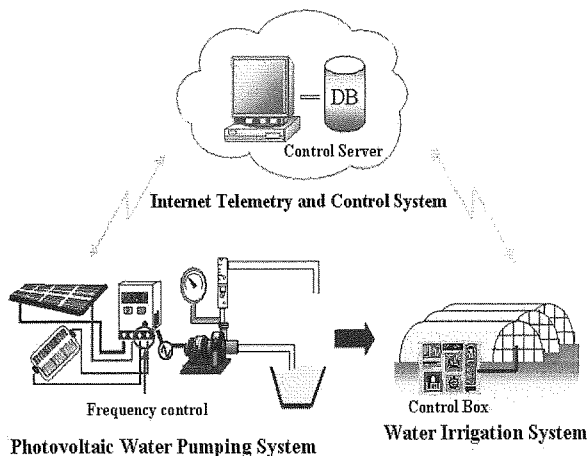


Fig.1 Schematic diagram of IT farm
図1. ITファームの概念図

2.1 インターネット遠隔計測・制御システム

インターネット遠隔計測・制御システムは、太陽光発電揚水システムおよび灌漑システムの状態を無線LANネットワークを通して遠隔監視するシステムである[4]。システムの中心となるコントロールサーバではエージェントシステムを導入し、太陽光発電システムや温室の気温、湿度、日射量の計測データ収集とそれらのデータのデータベース化を行う。また、コントロールサーバはWebサーバとしても稼働しており、インターネット上からブラウザを用いたデータベースへのアクセス、システムの運転状況の確認や遠隔制御が可能である。

2.1.1 無線LANネットワーク

まず、本研究で実験環境として大学内に構築した無線LANネットワークについて述べる。我々の大学では、工学部と農場の間には距離があり、それぞれに設置してあるシステム間で既存の有線通信網を用いた通信路を確保することが困難であり、また、導入・運用コストも多大になる。従って、実際にITファームを離島や遠隔地に設置し、コントロールサーバを設置する管理基地局と農場をネットワークで結ぶ場合も同様な問題が生じる。そこで、本研究では有線通信路を必要としない無線LANネットワークを構築した。本システムの最終形態では、無線LAN機器の電源は小規模の太陽電池・バッテリーシステムを想定するが、本実験では便宜上商用電源を用いた。

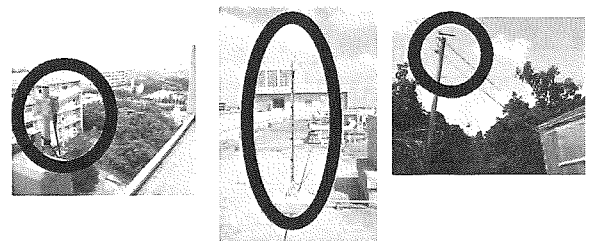


Fig.2 Wireless Network Systems
図2 無線LANシステム

無線LANネットワークは、工学部、農学部、農場に設置されている無線LAN装置により構成される。工学部と農場の間には木々や建物などの障害物があり直接無線通信を行うのは困難であるため、農学部には無線LAN装置を中継局を設ける。工学部と農場には指向性アンテナ、農学部には無指向性アンテナが設置してある。工学部から農学部までの直線距離は約200m、農学部から農場までの直線距離は約300m、工学部から農場までの直線距離は約400mとなっている。構築したネットワークの無線LAN機器は2.4GHz帯(IEEE802.11b)であり、それぞれのアンテナ間は通信に影響を及ぼす障害物がないため、通信速度11Mbpsで利用可能である[3]。この無線LANネットワークを用いることで、農学部を設置してある無線LAN装置を経由して工学部と農場の間で通信が可能となっている。無線LANのメリットとして以下のことが挙げられる。まず、配線の損傷が無視できることや、導入・運用コストが低い、さらに、移動が簡便である。また、拡張性に優れているという点で、今後、システムの規模を拡大・変更した場合でも、無線LANネットワークの構成を柔軟に変更することが可能である。さらに、『ITファーム』の作物の生育状況は、インターネットに接続された工学部のサーバを介して、世界中どこからでもシステム管理が可能となる。

2.1.2 エージェントシステム

本研究のエージェントシステムは、エージェントが外部環境データを回収し、システム全体の状況を認識するとともに、他の処理系と協調することで、任意の処理項目について問題解決を行う処理系であるという定義に従う[5]。エージェントシステムは、ユーザのニーズに応じて自身や他のシステムの運転状況、データベースから得た情報などを考慮し、それぞれのシステムの今後の運転計画を決定する。また、複数のエージェントを協調させるマルチエージェントシステムに拡張することで、ITファームの自律分散協調系を実現することが可能となる。マルチエージェントシステムでは、たとえば、作物を収穫したいというユーザの要求に対して、気温、湿度、日射などの気象情報、生育状況や市場価格、ユーザ側の予定などの必要情報を各データベースやWebサイトから収集し、収穫に向けた作物

の生育計画を自律的に策定する機能を導入することも可能となる。

2.1.3 Web インターフェース

Web インターフェースを用いることで、インターネット上からデータベースへのアクセスが可能となる。また、農場に設置してあるネットワークカメラなどの機器の動作状態の監視や制御を行うことができる。作成した Web インターフェースを図3に示す。

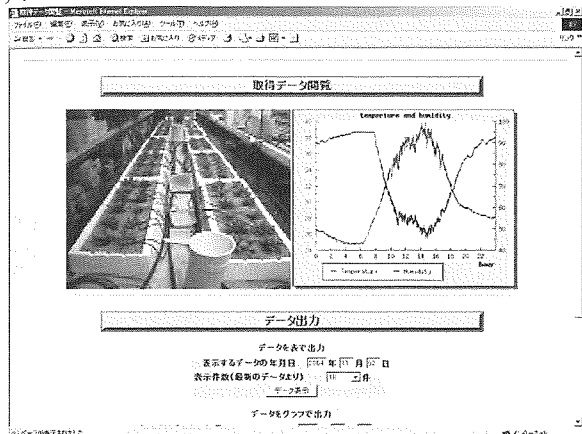


Fig.3 Web interface of the IT farm.

図3 Web インターフェース

図の左上はネットワークカメラによる画像が表示されており、ビニールハウス内の様子や作物の生育状況はウェブブラウザを用いて、どこからでもリアルタイムに確認することができる。図の右はビニールハウス内の気温と湿度の時間的変化を表にして表示している。図の下部のフォームではグラフで出力するデータ項目の選択、日付や時間帯の指定などのカスタマイズが可能となっている。また、データ出力では html 形式による表の描写や Excel 形式ファイルの生成など、さまざまな出力形式に対応している。さらに、異常気象や天災など、予期せぬ事態が発生した場合にはユーザによる灌漑計画の確認・編集が可能となっている。

3. 直接駆動型揚水システム

ここでは、まず、バッテリーレスシステムの概要を述べ、実際の揚水試験結果を説明する。

3.1 システム概要

本システムの概要を図1左下に、また、表1に本システムで用いている機器の仕様を示す。なお、太陽光発電システムは、最大108W×10枚、計1,080Wの容量である。本研究では、ポンプ駆動用太陽電池の供給電力の増減に応じてインバータ周波数を制御し、ポンプを回転させる方式を提案した。具体的には、太陽電池により発電された直流電力をバッテリーに蓄電せずに、インバータを介して直交流変換し、三相誘導電動機を駆動させ、揚水ポンプにより水を汲み上げる仕組みである。ここで、別途併設した日射量モニター用小型太陽電池の出力(抵抗不可の両端にかかる電圧)を、インバータ周波数の制御用入力として利用した。インバータ制御回路の出力周波数は小型太陽電池の出力に依存するため、インバータは日射量の変動に併せた周波数制御を行うことが可能となる[4]。

表1 本システムの仕様

Table.1 Spec of the Photovoltaic system.

PV modules for pumping system	P _{max} 108W, V _{pmax} 33.8V, I _{pmax} 3.20A, silicon single crystal, 10modules
Monitor PV module for frequency control	350mA - 1.4V
Inverter	400W
Pump	200W, induction motor

3.1.1 周波数変化に対する水頭と吐出量の関係

一般の揚水ポンプは50Hzないし60Hzでの使用が定められているが、本研究では、太陽光入射エネルギーが小さいときでもポンプの稼働を行わせる必要がある。従って、インバータ周波数をパラメータとしたポンプの揚水実験を行った。それを図4に示す。ここで、横軸は水頭で、縦軸は水吐出量である。この結果より、周波数が30Hzから増加するに従って、一定の水頭に対し水吐出量は増加し、また、一定の水吐出量に対し水頭が高くなる結果を得た。すなわち、インバータ出力周波数が30Hzから70Hzまでの間でポンプの運転が可能であることが示された。なお、70Hz以上の周波数でも運転可能であるが、ここでは、ポンプ保護のため、インバータ出力最大周波数を70Hzと定めた。以上の予備実験を基に、以下のインバータ制御回路を製作した。

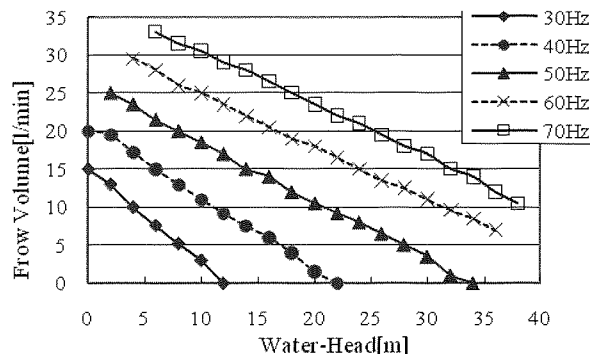


Fig.4 Relation between water-head and pump-discharge varying the frequency of inverters.

図4. 周波数の変化による水頭と吐出量の関係

3.2 システムの駆動原理と制御回路

本研究ではバッテリーを使用せずに太陽電池から供給される直流電力を、直接インバータを介して交流に変換し、誘導電動機を駆動電源とする揚水ポンプを駆動し水を汲み上げる灌漑システムの構築した。この系ではシステム駆動用電源に太陽電池を使用しているので、商用電源を利用する場合では発生しえない特殊な事例が生じる。すなわち、汎用インバータを商用電源で運転すると、負荷が大きく変化することがあっても電圧の変動が無いため安定した動作をする。しかし、本システムではインバータへの供給電圧は太陽電池を用いているため、それは日射量に依存する。すなわち、日射量が低い条件下において消費電力が太陽電池の供給可能電力を上回ると、太陽電池の出力特性により太陽電池からの供給電圧は急激に減少し短絡状態に陥る。その結果、太陽電池からインバータへの供給電圧が不十分となり出力を停止する。

以上のような太陽電池と汎用インバータの諸特性により、電圧が一定でないバッテリーレス揚水システムには以下の2つの問題点がある[6]。

- (1) 市販の汎用インバータは太陽電池から十分な電力を供給されてもシステムの無人始動が不可能である(手動による

運転開始作業が必要)。

- (2) 曇りや誤動作等の影響で太陽電池電源からの電力の供給が一時的に停止した後、再度電力供給が行われた場合、システム再始動に必要なリセット(異常解除)、運転開始の動作を手動によって行なわねばならない。

上記の2つの問題点は、揚水システムを設置するために解決すべき最重要課題である。これらの問題点を解決するために、インバータの異常状態を解除するためのリセット機能、自動運転開始機能、及び、周波数制御機能を装備したインバータ制御回路の設計を行った(図5参照)。設計した回路はその機能により制御部定電圧回路、周波数制御回路、異常検出回路、運転指令回路の4つの部分に分類することができる。以下にその各機能の動作原理を示す。

3.2.1 制御部の定電圧回路

回路で用いるオペアンプ(増幅器)の電源としては定格 12V 必要であり、その 12V を得るために DC/DC コンバータ(7~12V, 入力で定格電圧 12V を出力、以下コンバータ)を利用している。そのコンバータの入力は小型太陽電池から供給されている。日の出とともに太陽電池からの出力電圧が非常にゆるやかに上昇していくと、コンバータは正常に動作しない。そこで電圧が低い間はコンバータに入力電圧を供給せずに、入力電圧が 8.8V に達した時に瞬時に電圧がコンバータに入力されるように回路を作製した。これにより、コンバータから正常に定電圧を取り出すことができる。ここで回路のオン、オフが過敏にならないようにヒステリシスを持たせてある。

3.2.2 周波数制御回路

誘導電動機の回転数を可変とするために日射量センサである小型太陽電池からの出力をオペアンプを通して増幅し、周波数制御を行なう。オペアンプの入力部に可変抵抗を直列に接続し、可変抵抗の抵抗値を変えることにより、どの程度の日射量でインバータの周波数制御部に信号を送るかを調節することができる。この可変抵抗は下記の運転指令回路にも同様に影響する。この周波数制御回路により太陽電池の出力、すなわち日射量の変動に応じて周波数を可変することができ、揚水ポンプの回転数を調整できる。また、日射量検出用太陽電池に適当な並列抵抗をつなぐことにより太陽電池の出力電圧を線形化することが可能となるため[6]、周波数と太陽電池発電電圧、周波数と日射量に関し比例の関係となる。

3.2.3 異常解除回路

揚水システムで使用している汎用インバータは、日射量が低下し、入力電圧が規定値より下がると異常状態を画面表示し、接続している負荷(誘導電動機)への電力供給を停止する。インバータが一旦異常状態になるとリセット信号をインバータ側に送信しない限り、たとえインバータへ運転信号が入力されていても誘導電動機の運転は開始されない。そこで、インバータから異常信号が発信されると回路を動作させ、リセット信号をインバータに送信するように設計を行う。DC/DC コンバータの出力電圧が正常であることを確認すると同時に、さらに揚水システム駆動用電源として用いている太陽電池からの出力が 280V 以上であるという 2 つの条件を満たした時、インバータの異常状態を解除するためのリセット信号を発信する。この回路からリセット信号がインバータに送信されると、インバータは運転開始待ち状態になる。

3.2.4 運転指令回路

誘導電動機を運転するにはインバータ側からの交流電力の供給が必要である。供給を開始するにはインバータの運転指

令部に信号を送らなければならない。また何らかの原因でインバータが異常状態になり誘導電動機の運転が停止した場合、異常状態を解除するためのリセット信号をインバータが受信し運転開始可能状態になる。しかし運転を再開するためには運転指令部に信号を送信しなければならない。そこで DC/DC コンバータが正常な電圧を出力し、且つ異常解除回路がリセット信号を送信した後に、運転指令信号がインバータ側に送信され揚水ポンプの運転が開始される。

以上の 4 つの回路(制御部の低電圧回路、周波数制御回路、異常解除回路、運低指令回路)を合成し、ひとつのユニットにまとめた制御回路を図5に示す。

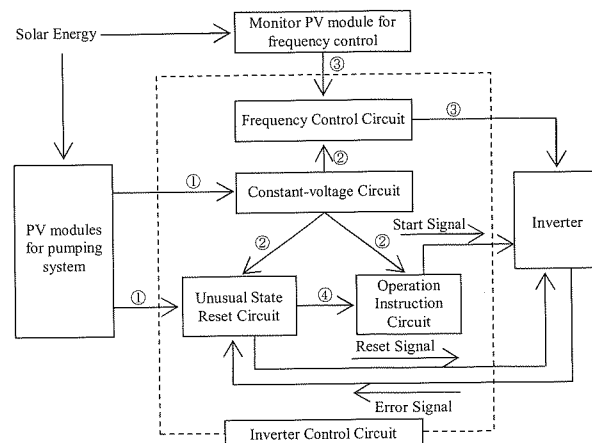


Fig. 5 Schematic diagram of inverter control circuit
図 5. インバータ制御回路

この機能をまとめると以下のようになる。

- ① 日射量に対し非線形な電圧を発電する。
- ② オペアンプ、IC 作動に必要な定電圧を供給する。
- ③ 日射量に対し線形な電圧を供給し、周波数を制御する。
- ④ リセット信号をインバータに送信し、異常状態を解除したことを伝える。

3.3 性能実験

本研究で構築したバッテリーレス発電システムの晴天時と曇天時に行った性能試験を図6および図7に示す。今回の実験ではポンプ回転数を決定するインバータ出力周波数(瞬時値)に対する日射量、ポンプ吐出流量(水頭 10m)、電流-電圧特性、電力特性を示す。

図6-(a)のグラフより、午前8時半頃から日射量が 150W/m^2 以上になるとインバータ周波数が 0Hz から立ち上がり、日射量の増加に比例して上昇することが分かる。なお、ここでは日射量が 400W/m^2 の時に周波数が最大値 70Hz に達するようにインバータ制御回路で設定しているため、午前 9 時半以降は日射量が増しても周波数は上昇していない。次に、図6-(b)のグラフより、インバータ周波数がポンプ誘導電動機の回転数を決定するため、インバータ周波数とポンプ吐出流量が比例していることが分かる。午前8時半頃に流量がスタートしており、それはインバータ周波数の立ち上がりと一緒に一致している。図6-(c)に PV モジュール一枚の電流-電圧特性を示す。図6-(a)の日射量特性と照らし合わせると、午前7時に太陽電池は発電を始め、電圧が徐々に上昇しているが 15V を越えた時点で急降下している。これは、インバータの受給電圧が 150V に達して、インバータが起動したことによる電圧降下である。午前8時半頃に太陽電池電圧が 28V に達したのと同時に電流が急上昇している。これはインバータ制御回路にて、 $28\text{V} \times 10 =$

280V(太陽電池 10 枚の直列接続)を超えたら回路が動作し、揚水ポンプが駆動し始めるように設定されているためである。午後5時半頃には、日射量低下により太陽電池の発電電圧が250V に下がり、インバータへ流れる電流も急激に下がっている。すなわち、インバータ制御回路にて受電電圧が250V 以下になると揚水ポンプの運転を停止するように設定されているためである。図6-(d)に周波数-電力特性を示す。ここで、図6-(a)の日射量のグラフと対応させると、午後5時半頃日射量が0 になるが、その後、日射量が増加すると、リセット回路が動作し、再度、インバータが起動していることが分かる。

曇天時における同様な実験を図7-(a)-(d)に示す。この図より、午前9時半以降から午後4時までにかけて断続的にインバータの電源のオン、オフが頻繁に現れている。これは、太陽電池の発電電圧が不十分のために周波数制御回路が稼働しているからである。しかし、このような曇天時においても、100w /m² 程度の日射量があればポンプが駆動し、揚水が可能となる。晴天時と曇天時におけるシステムの運転結果を表2に示す。この表と上記の実験結果より、本研究で開発した制御回路(図5)による、自動リセット方式、周波数制御方式が充分機能していることが確認された。

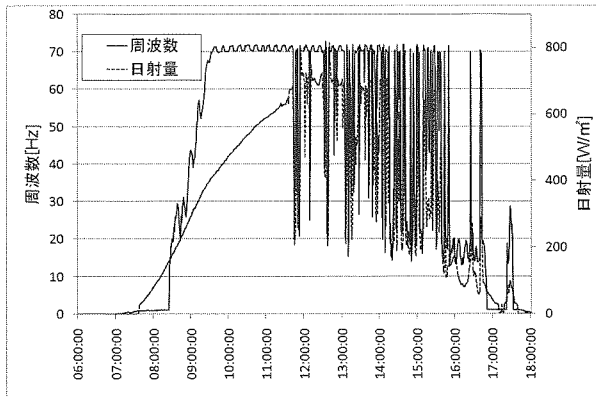


Fig.6(a) Hourly changes of inverter frequency and total irradiance in fine day

図6-(a) 周波数と日射量の時間変化(晴天時)

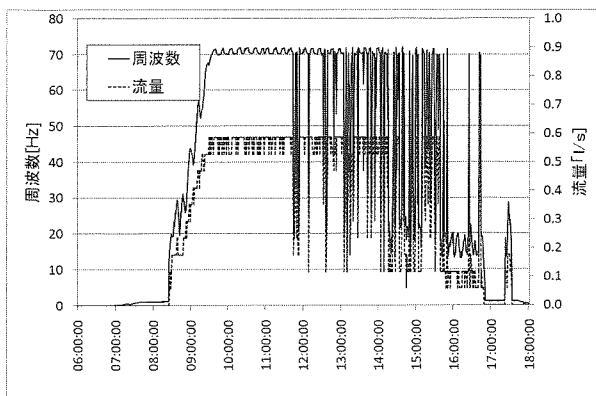


Fig.6(b) Hourly changes of inverter frequency and pump discharge rate in fine day

図6-(b) 周波数とポンプ吐出量の時間変化(晴天時)

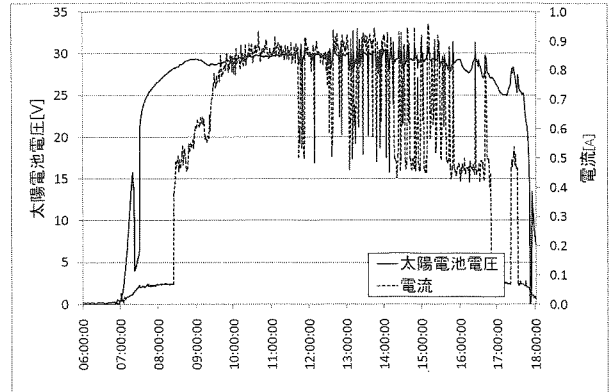


Fig.6(c) Hourly changes of voltage and current in fine day

図6-(c) 電圧と電流の時間変化(晴天時)

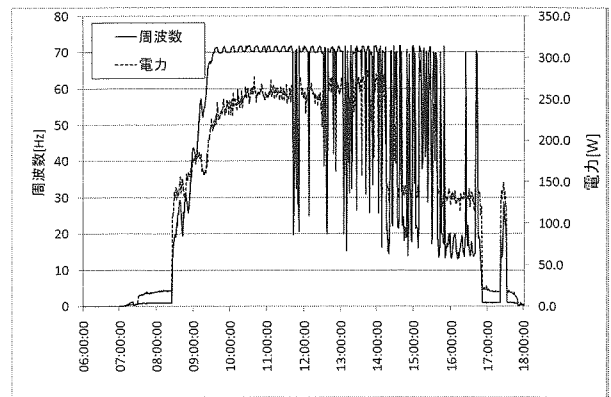


Fig.6(d) Hourly changes of inverter frequency and electric power in fine day

図6-(d) 電圧と電流の時間変化(晴天時)

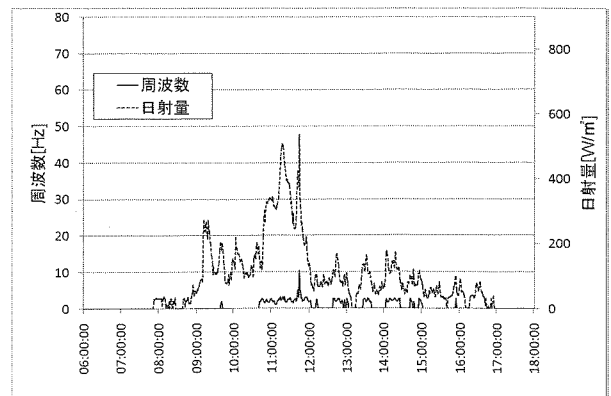


Fig.7(a) Hourly changes of inverter frequency and total irradiance in cloudy day

図7-(a) 周波数と日射量の時間変化(曇天時)

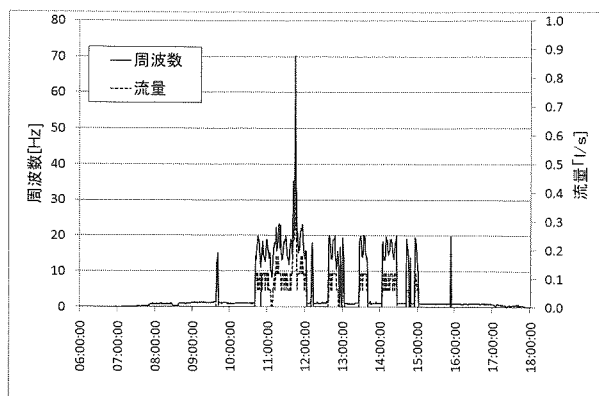


Fig. 7-(b) Hourly changes of inverter frequency and pump discharge rate in cloudy day

図7-(b) 周波数とポンプ吐出量の時間変化(曇天時)

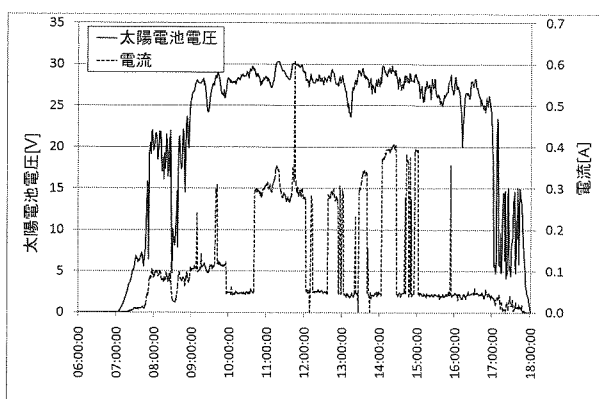


Fig. 7-(c) Hourly changes of voltage and current in cloudy day

図7-(c) 電圧と電流の時間変化(曇天時)

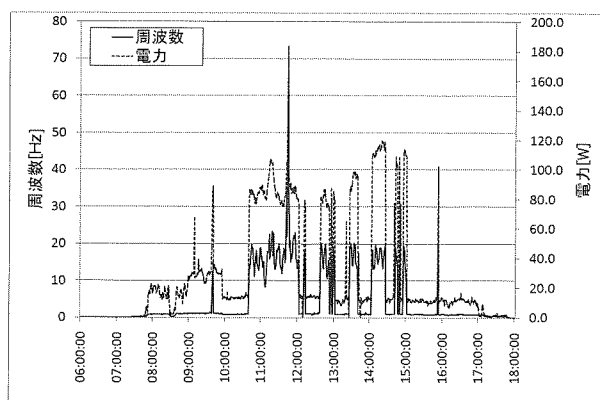


Fig. 7-(d) Hourly changes of inverter frequency and electric power in cloudy day

図7-(d) 電圧と電流の時間変化(曇天時)

表2 各天候における揚水システム運転結果
Table.2. Result of water-pumping system operation under two weather conditions

	Fine day	Cloudy day
Total irradiance hours in the day	9hrs.59mins.	8 hrs.32mins.
Pump operating time	8hrs.33mins.	2hrs.36mins.
Pump average operating time[%]	86	30
Pumping water volume [Ton/day]	12.792	0.958
Consumption of electric power[kWh]	1.83	0.35
Maximum sunlight power[W/m ²]	819	538
Average sunlight power[W/ m ²]	373	118

4. 作物の要求水分量に応じた最適灌漑用水量の推定法

本章では、エージェントの一機能である灌漑計画決定アルゴリズムを設計するために、サラダ菜の生育に関し、必要とされる要求水分量を推定するための実験を行い、推定式を構成した。実験では、作物の生育に伴う消費水分量の変化と、気温、湿度、日射量などの環境データ間との関係を調べる。実験の様子を図8に示す。



Fig. 8 Scenery of water irrigation experiments.

図8. 散水実験風景

一般に、生育に必要な水分量を決定する場合は、植え付けから収穫までを1サイクルとしてデータを整理するため、サイクル期間が長い作物を用いて実験を行う場合、サイクル単位で見ると一定期間内に得られるデータ量は少なくなる。そこで今回は、比較的サイクル期間が短いサラダ菜を用いて実験を行う。実験は苗の植え付けから収穫までの約2週間行う。この実験では、サラダ菜の生育における昼間と夜間の消費水分量に加え、サラダ菜の日々の生長度合いを作物生育データベースに手動で記録する。

ここで、消費水分量とはサラダ菜自身が消費する水分量(蒸散量)と土壌からの蒸発量を含む。昼間と夜間の消費水分量を比較すると、晴天で日射が強いときは蒸散と蒸発が同時に起こるため昼間の消費水分量が多い。この特徴を活かすために、1日を昼間と夜間の2回に分けて消費水分量を記録する。消費水分量データの取得においては、サラダ菜を植えつけているプランターが大体3000g-5000gであり、それを自動化して計測する機器がないために、合計16鉢の重量を手動で計測した。それと同時に、コントロールボックス内のセンサによる気

温, 湿度, 日射量や参考データとして土壌水分量などの環境データ自動取得を行った。環境データ取得のサンプリング周期は1分であり, 1日に1440点のデータを取得した。

図9-(a)は消費水分量と平均気温のデータをグラフ化した実験結果である。グラフでは, 消費水分量と平均気温の相関関係を見るために水分が消費される間の平均気温データがプロットされている。つまり, ある日の昼間の消費水分量に対して同日のAM8:00~PM6:00の平均気温が, 夜間の消費水分量に対しては前日PM6:00~同日AM8:00の平均気温がプロットされている。同様にして消費水分量と平均湿度, 消費水分量と平均日射量との関係をグラフ化したものをそれぞれ図9-(b), 図9-(c)に示す。

4.1 消費水分量と気象環境データ

サラダ菜は日々生育するのに伴い, 1日に消費する消費水分量のグラフは右肩上がりになると思われる。しかし, 実験の結果を見ても分かる通り, サラダ菜の消費水分量は日々のサラダ菜の生長とともに増加すると一意的にはいえない。これは, 消費水分量の増減はサラダ菜自身の生育による影響が少ないことを意味する。一方, 3つのグラフから消費水分量は気象環境データと強い相関関係があるといえる。消費水分量と各々の気象環境データとの相関係数を表3に示す。本実験より, サラダ菜の消費水分量の増減は気温, 湿度, 日射量の気象環境データに大きく依存することが分かった。この結果から, 最適灌漑計画決定における一手法として, 気温, 湿度, 日射量等の気象環境データから灌漑計画を算出する方法が考えられる。

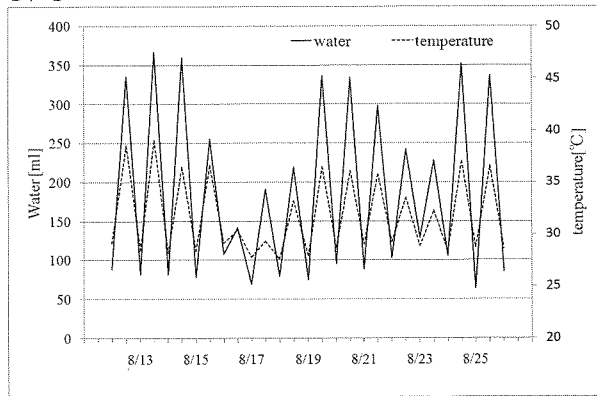


Fig.9-(a) Daily changes of water consumption amount and average temperature

図9-(a) 消費水分量と平均気温の日変化

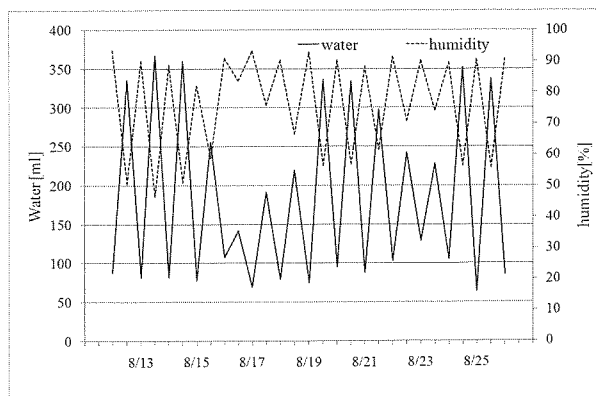


Fig.9-(b) Daily changes of water consumption amount and average humidity

図9-(b) 消費水分量と平均湿度の日変化

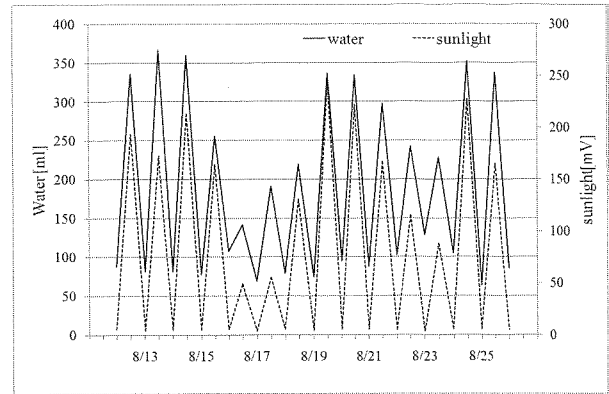


Fig.9-(c) Daily changes of water consumption amount and average sunlight

図9-(c) 消費水分量と日射量の日変化

表3 消費水分量と環境データ間の相関

Table.3 Correlation coefficients between water consumption and environmental data

Environmental data	Correlation coefficients
temperature	0.9704
humidity	-0.9769
sunlight	0.9723

4.2 重回帰分析による必要水分量推定

実験により取得したサラダ菜の昼間または夜間の消費水分量は, サラダ菜の生長に最低限必要とされる必要水分量となる。本研究では実験データを基に平均気温, 平均湿度, 平均日射量を入力として必要水分量を推測する。本研究では, 実験データを重回帰分析[7]を用いて解析し, 灌漑アルゴリズムを決定する。ここでは, 2週間分の実験データを前半1週間と後半1週間に分ける。前半1週間分のデータを標本(解析データ)として重回帰式を求め, 後半1週間分のデータを用いて求めた重回帰式の精度検証を行う。ここに, 目的変数としてサラダ菜の消費水分量 Y [ml]を, 説明変数として平均気温 x_1 [°C], 平均湿度 x_2 [%], 平均日射 x_3 [w/m²]とする。それぞれの回帰係数を a_1, a_2, a_3 とした場合, 以下の重回帰式を構成することができる。

$$Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_0 \quad (1)$$

ここに, a_0 は定数項である。重回帰分析では予測値と実測値 y の誤差を小さくするため, 平方和 $Q = \sum (y - Y)^2$ を最小にする回帰係数 a_1, a_2, a_3, a_0 を求めるために, 次式

$$Q = \sum \{Y - (a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_0)\}^2 \quad (2)$$

をそれぞれ, a_1, a_2, a_3, a_0 で偏微分し整理すると以下の正規方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} S_1^2 & S_{12} & S_{13} & N\bar{x}_1 \\ S_{12} & S_2^2 & S_{23} & N\bar{x}_2 \\ S_{13} & S_{23} & S_3^2 & N\bar{x}_3 \\ N\bar{x}_1 & N\bar{x}_2 & N\bar{x}_3 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{1y} \\ s_{2y} \\ s_{3y} \\ N\bar{y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 S_{ij} 等はそれぞれ、 x_i, x_j の共分散であり、また、 $\bar{x}_i, \bar{y}$ は x_i, y の平均値、さらに、 N はデータの個数を表す。前半一週間分のデータ(14観測点)を基に分散、共分散を求め、以下のような重回帰係数を得た。

$$\begin{cases} a_1 = 1.76 \\ a_2 = -3.710 \\ a_3 = 0.48 \\ a_0 = 365.37 \end{cases} \quad (4)$$

次に、後半1週間分のデータを用いて重回帰式の制度検証を行った。その結果を図10に示す。グラフの直線は消費水分量の実測値、点線は式(1)から求めた必要水分量の予測値である。実測値と推測値の相関係数は0.9885であり、非常に高精度な回帰式を得ることができた。今回の検証では、わずか1週間分、14点のデータを用いた場合でも必要水分量の推測が十分に可能であることが示された。しかし、今回はサラダ菜という短期間で栽培、出荷が可能なものに関する実験であり、一月や半年ほどで成長する果樹等に適用することが必要となる。

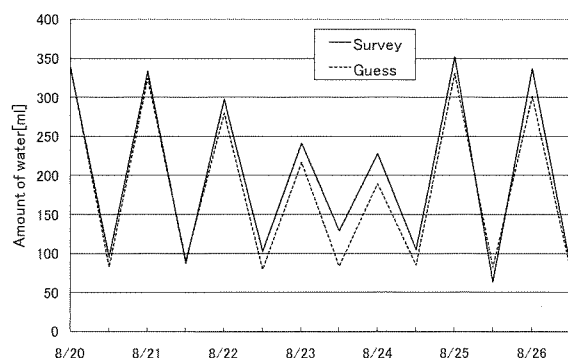


Fig.10 Verification of multiple regression equation
図10. 重回帰式の検証

5. まとめ

本研究では、農業用大規模独立型発電システムの構築を目的として、インターネットによる作物生育のための遠隔監視・制御システムの開発と太陽光発電を用いた農業用灌漑用水供給減としての自律型バッテリーレス発電システムの開発を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) インターネット遠隔監視・制御系：無線 LAN 及びデジタル回線 (ISDN64K) により接続されたネットワーク回線を用いて、温室ハウス内の環境計測とデータベース化、さらに、web 上での作物生育状況のモニタリングを実現した。
- 2) 自律型太陽光発電系：入力日射量の変化に応じて、インバータ出力周波数を可変とする周波数制御システムを構築した。このシステムでは、周波数可変制御、異常検知・

リセット、再起動回路より構成される。

- 3) サラダ菜を栽培対象とした最適灌漑用水量推定式：サラダ菜の生育のための要求水分量に応じた灌漑水量を決定するため、気温、湿度、日射量に基づく回帰式を構成し、実験値と推定値との評価を行った。その結果、作物の必要水分量の推定がこの回帰式で推定できることを示した。しかし、多種の野菜や果樹について育成試験を行う必要があり、これは今後の課題とする。

本研究で構築したシステムは、将来、遠隔地の農場等を対象として、独立電源を用いた自律型 IT ファームを実現するための先行的な研究開発として位置づけられる。このパイロット IT ファームの開発を基礎に、今後は、多品種の野菜や果樹の生育実験を行い、実用化に向けた完成度の高いシステム構築を行う。このシステムが実用化できると、エージェントシステムを用いた作物への最適灌漑計画の決定や、灌漑の自動化が期待される。さらに、太陽光発電揚水システムによる水資源の提供によって、農業用水の大幅な節約や人的コスト低減が期待できる。

謝辞：作物の最適要求水分量の算出において、本学農学部生産環境学科吉永安俊教授に貴重な御指導をいただきました。ここに深謝いたします。最後に、本研究は文部科学省科学研究費(基盤 B:13450165)により遂行された。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 伊東弘一、大岡五三実：“エネルギー工学概論”，コロナ社(1997)。
- [2] 山城，玉城，長田，谷口：太陽光発電を基盤とした IT ファームの構築，平成 15 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究会発表会講演論文集 pp.531-534(2003)。
- [3] 橋本昭則：無線 LAN におけるシャドーイングを考慮した分散型分散型アクセス制御方式，電子情報通信学会論文誌 B, 83, 2, pp.175-184(2000-2)。
- [4] Naoki Motomura, Hideo Arakaki, Shiro Tamaki, Kenji Onaga: "A study to Develop a Direct water pumping System using Solar-Energy" International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (1999)。
- [5] 中谷多哉子・羽生田栄一・黒川利明・直田繁樹・大須賀昭彦・児玉公信・増村均・中村正規・田中立二：オブジェクト指向，エージェント技術の動向，電学論 C, 123, 4, pp.640-648(2003-4)。
- [6] 本村直樹：太陽電池を用いた直接駆動型揚水システムの研究開発及びボンドグラフによる性能評価，平成 11 年度琉球大学理工学研究科博士前期課程修了論文(2000-3)。
- [7] 有馬哲・石村貞夫：“多変量解析のはなし”，東京図書(2000-6)。