

研 究 期 報

No. 103

平成 27 年 12 月

四 国 電 力 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研究期報 103号 目次

長距離配電線における大規模太陽光発電の無効電力制御による電圧変動抑制 1

Reactive Power Control of Large-Scale Photovoltaic System
for Voltage Regulation with Long Distribution Line

四国に影響を及ぼす降下火山灰に関するシミュレーション解析..... 9

Simulation analysis for air-fall ash influences on Shikoku Island.

植物生体情報計測用の組込み型画像処理技術の開発について 23

Development of embedded image processing technology for measurement
of plant biological information

長距離配電線における大規模太陽光発電の無効電力制御による電圧変動抑制

目 的

配電系統にメガソーラー発電など大規模太陽光発電（PV）が連系された場合の電圧変動抑制対策としてパワーコンディショナ（PCS）の無効電力制御（力率一定制御）が導入されている。しかし、同制御は長距離配電線において線路電力損失変動の影響で PV 連系時の電圧変動が拡大し、PV が連系できない問題がある。

そこで本稿では、長距離配電線に PV が連系した場合の電圧変動を抑制する PCS の無効電力制御を提案した。

主な成果

PV 連系時における配電線の電圧変動および線路電力損失変動に影響を与える配電線負荷および PV 出力を PCS の無効電力制御の入力項目とした。

シミュレーションによる検証の結果、出力 2MW の PV が 6.6kV 配電線に連系する場合、従来の力率一定制御においては、PV が連系可能な範囲は変電所から 7.5km の範囲に限定されていたが、提案手法の適用により電圧変動が抑制されて変電所から 18km の範囲まで拡大することがわかった。

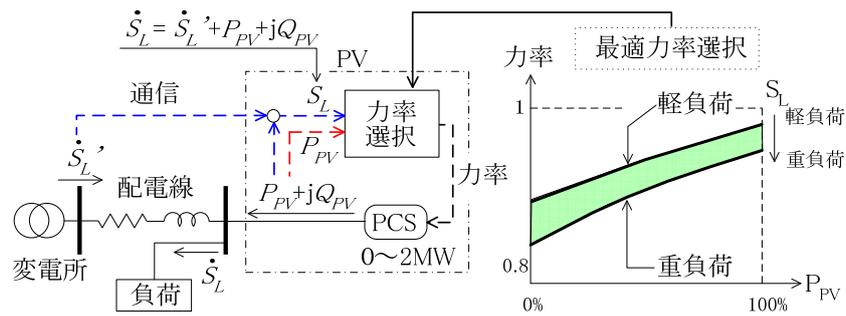


図1 提案手法の概念図 (通信方式)

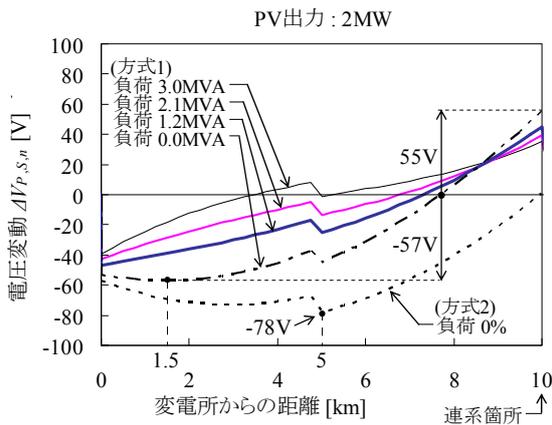


図2 区間別電圧変動

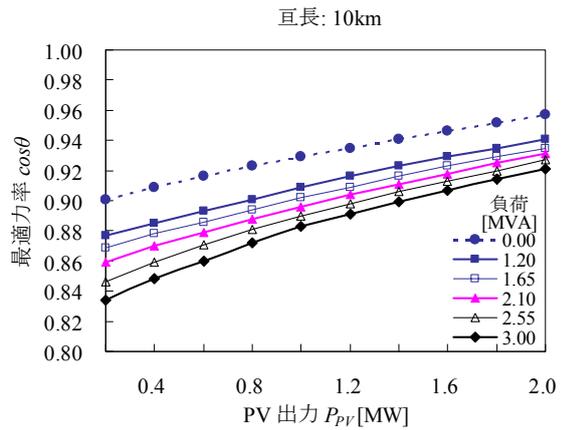


図3 PV出力と最適力率

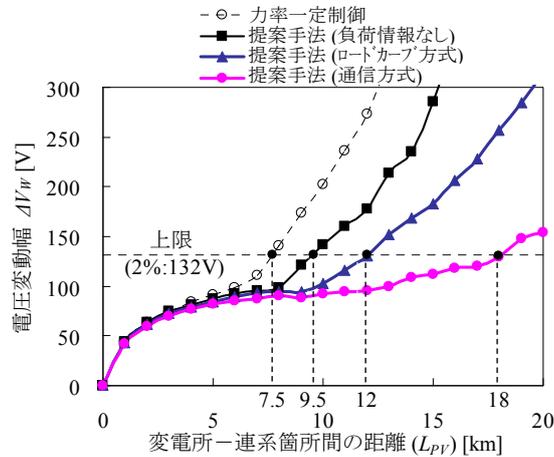


図4 従来手法と提案手法の電圧変動幅の比較

研究担当者	河野 高一郎 (株式会社四国総合研究所 電力技術部)
キーワード	太陽光発電, メガソーラー, 配電線, 電圧変動, 電圧制御, 無効電力制御, 力率一定制御, パワーコンディショナ, PCS
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]

四国に影響を及ぼす降下火山灰に関するシミュレーション解析

目 的

四国には火山が分布しないものの、風上に位置する九州の火山が大規模な噴火を起こした場合には、偏西風に乗って四国へ火山灰が降下し、各種電力設備に影響を及ぼす可能性がある。特に原子力発電所の安全対策には万全を期すことが必須であり、原子力規制委員会制定の「原子力発電所の火山影響評価ガイド」において、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出して発電所運用期間中の噴火規模に対応する降下火山灰を考慮することが求められている。

伊方発電所周辺の地質調査により、敷地付近への火山灰の降下層厚はほぼ 0 cm と評価される。しかし、風向きによっては敷地において数 cm 以上の層厚の火山灰が降下することも想定される。そこで、気象条件の不確かさを考慮した火山灰降下リスクを評価するために、降下火山灰シミュレーションを用いた解析的検討を実施する。

主な成果

1. 伊方発電所に影響を及ぼし得る降下火山灰の抽出

伊方発電所の風上に位置する由布岳、九重山および阿蘇山の噴火について、月別平年値の風を用いて降下火山灰シミュレーションを行った結果、敷地に最も影響のある噴火は九重第一降下軽石（噴出量 2.03 km³）であり、敷地における降灰層厚は月平均で 0.5 cm、最大となる 9 月において 2.2 cm であった。ジェット気流の強くなる冬季（11 月～5 月）には降灰層厚 0～0.2 cm であった。

2. 不確かさを考慮した九重山の噴火による火山灰層厚の評価

敷地方向に吹く仮想的な風を考慮した場合、敷地における降下火山灰厚さは 4.5 cm であった。さらに、火山灰の噴出量の正確な見積もりが難しいことや最近の研究動向を踏まえて噴出量 6.2 km³ と噴火規模を大きく見積もった場合、最大である 9 月の平年値の風で敷地における降下火山灰厚さは 6.9 cm であった。

Table 1 Calculated thickness of volcanic ash at Ikata Power Plant.

Volcanoes		Yufu	Kuju	Aso
Thickness at Ikata Site (cm)	Jan	0.0	0.0	0.0
	Feb	0.0	0.0	0.0
	Mar	0.0	0.0	0.0
	Apr	0.0	0.1	0.1
	May	0.1	0.2	0.1
	Jun	0.2	0.6	0.2
	Jul	0.2	1.5	0.7
	Aug	0.0	1.1	0.7
	Sep	0.3	2.2	1.0
	Oct	0.2	0.2	0.1
	Nov	0.0	0.1	0.0
	Dec	0.0	0.0	0.0
	Average	0.1	0.5	0.2

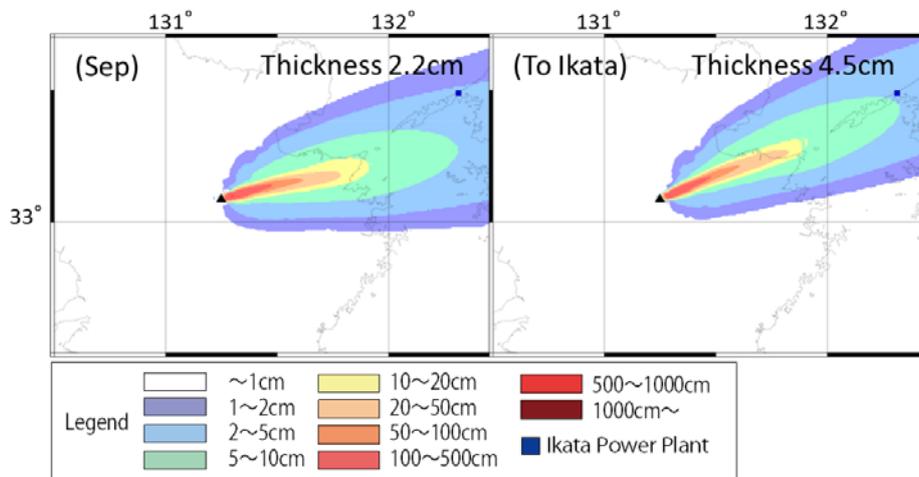


Fig. 1 Isopack maps of ash from Kuju computed for the average wind of September (left) and for the wind blow to Ikata Power Plant (right).

研究担当者	辻 智大, 池田倫治, 加藤佐代正 (土木技術部) 西坂直樹, 大西耕造 (四国電力)
キーワード	降下火山灰, シミュレーション, TEPHRA2, 由布岳, 九重山, 阿蘇山
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]

植物生体情報計測用の組み型画像処理技術の開発について

目 的

当社では、農業用ハウス内の環境条件を高精度かつ低コストに遠隔モニタリングすることを可能とする画期的な栽培環境モニタリングシステム（ハッピー・マインダー）を開発・販売しており、オプションカメラによる植物体の定期静止画像撮影も可能となっている。

今のところ、得られた静止画像の活用は栽培記録程度に止まっているが、定期撮影された静止画像から植物の生育状況を判断する上で有用な画像情報を画像処理技術により自動抽出し、数値データとして収集・蓄積できれば日常の栽培管理の合理化ならびに栽培技術のマニュアル化に大きく役立つのではないかと考え、ハッピー・マインダーに組み込むことのできる植物生体情報計測用画像処理技術の開発を進めている。

主な成果

本画像処理技術の適用先のひとつとして、植物体のしおれ具合を画像処理技術によって検出する手法の研究を愛媛大学と共同で実施中である。現在、本画像処理技術を組み込んだシステムを用い、トマト栽培施設（愛媛大学農学部の知的植物工場）にて現地試験を継続中である。

今回、ハッピー・マインダーを利用した植物生体情報計測用の組み型の画像処理技術を開発し、トマト葉のしおれ具合の数値化し、植物の生体情報計測データとして取得することが出来た。

このような植物生体情報計測データを継続して収集できる仕組みを構築すれば、お客様が植物体の生育状況を数値データとして直感的に把握することが可能になり、さらに利便性が向上すると考える。

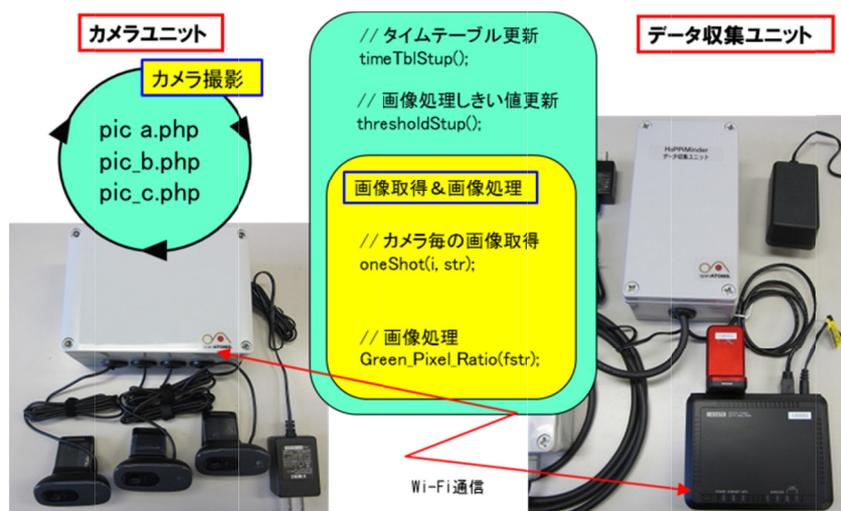


図1 カメラ画像取得および画像処理のイメージ

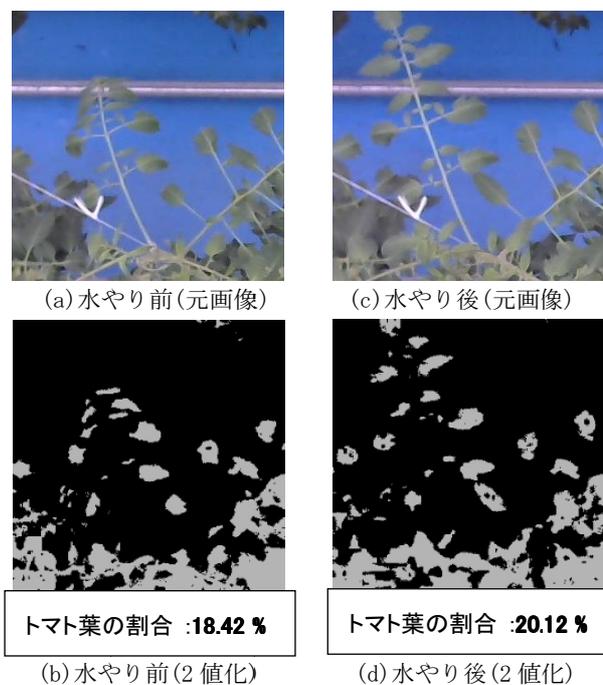


図2 水やり前後のトマト葉のしおれ具合の数値化

研究担当者	松浦英樹 (電子技術部)
キーワード	植物生体情報計測, 画像処理, HSV モデル, 2 値化, 組み込みシステム, OpenCV, Java, 葉のしおれ
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]

長距離配電線における大規模太陽光発電の 無効電力制御による電圧変動抑制

(株)四国総合研究所 電力技術部 河野高一郎

キーワード： 太陽光発電
配電線
電圧変動
無効電力制御
電圧制御

Key Words : Photovoltaic generation
Distribution line
Voltage variation
Reactive power control
Voltage control

Reactive Power Control of Large-Scale Photovoltaic System for Voltage Regulation with Long Distribution Line

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Dept.
Kouichiro Kouno

Abstract

Constant power factor control of a power conditioning system in a large-scale photovoltaic generation system (PV system), such as a mega-solar system, is introduced to mitigate voltage variations on a distribution line. However, it is difficult for the control to mitigate the voltage variation on a long distribution line because of the loss on the distribution line. This paper proposes an advanced reactive power control, in which the power factor of the PV system is adjusted both by output power of the PV system and by apparent power of loads not to minimize the voltage variation at the interconnection point but to minimize the voltage variation over the whole distribution line, and reports the result examined by numerical analysis about mitigating the voltage variation by applying the control using a communication network or a load curve as information about load. This paper shows that the proposed control can mitigate the voltage variation more than constant power factor control and there is a probability that it will be applied as a measure of suppressing the voltage variation on the long distribution line.

1. はじめに

近年、地球環境問題への対応やエネルギー源の多様化による安定供給の確保から再生可能エネルギーの導入が積極的に進められている。

配電系統にメガソーラー発電など大規模太陽光発電 (PV) が連系された場合、出力変動に伴う電圧変動が懸念されるが、この問題の対策の1つとして風力発電で実績のある無効電力制御 (力率一定制御) があり¹⁾、太陽光発電大量連系時の検討事例^{2),3)} やメガソーラー発電においてもパワーコンディショナ (PCS) の力率一定制御を用いた電圧変動抑制対策の適用例が見られる⁴⁻⁶⁾。また、メガソーラー発電連系時の電圧変動抑制に対応した無効電力制御も検討されている^{7),8)}。

筆者はメガソーラー発電連系時の電圧変動抑制対策として、PCS の力率一定制御を適用した場合の効果について、シミュレーション⁹⁾ および実系統を用いた実測結果¹⁰⁾ により検討し、連系箇所が変電所から 5km 程度のケースであれば、電圧変動は十分抑制される見通しを得た。一方、亘長が 10km を超過した長距離配電線では出力変動に伴う線路電力損失変動が大きく、電圧変動抑制対策として適用しがたいことがわかった¹¹⁾。

本稿では、長距離配電線におけるメガソーラー連系時の電圧変動抑制対策として、PV 出力および配電線負荷に応じて PCS の力率を変更する新たな無効電力制御手法 (力率変更制御) を提案し、その電圧変動抑制効果について、シミュレーションにより検証した結果を報告する^{12),13)}。

2. シミュレーションモデル

シミュレーションに用いた配電系統モデルを図 1 に示す。線種 ALOC120mm² の 6.6kV 系統を想定し、最大亘長 (L_L) 20km の系統に 250m 間隔にノードを置き、各ノードに等容量の負荷を置いた。

負荷力率は負荷の皮相電力により異なり、負荷の皮相電力について重負荷時を基準に 100%, 85%, 75%, 55%, 40%とすると、対応する負荷力率をそれぞれ 0.987 (遅れ), 0.993 (遅れ), 0.998 (遅れ), 0.999 (進み), 0.977 (進み) とした。

変電所 1 次側 (66kV) の電圧は PV の連系前後で一定とし、PV の連系前において、最大負荷時に変電所 2 次側の送出電圧が 6,840V となるよ

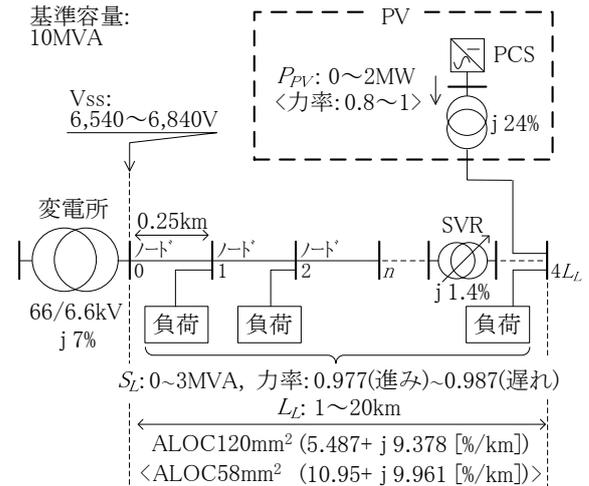


図 1 配電系統モデル

う調整した。また、線路の電圧降下が変電所から 600V となる地点毎に SVR を置いた。変電所および SVR の変圧比は PV の連系前後で変化しないものとした。

PV の定格出力は 2MW とし、配電線末端に連系トランスを介して系統と連系した。PV の力率は、PCS 出力端において、発電設備側からみて進み 0.80~1.00 (図 11 における ALOC58mm² のケースを除く) の範囲で変化させた。PV・負荷の電圧特性は定電力特性とした。

3. 力率一定制御

PV が配電線に連系した場合の電圧変動抑制対策として、従来手法である PCS の力率一定制御の電圧変動の特性を検討した。この制御では、(1)~(3)式に従い、PCS より出力される無効電力 Q_{PV} を常時一定力率 $\cos\theta$ で制御するものである。

$$Q_{PV} = \alpha P_{PV} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$= const. \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha = \sqrt{1/\cos^2\theta - 1} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 P_{PV} : PV の出力 [W], Q_{PV} : PV の無効電力 [var], θ : 力率角 [rad]

3.1 電圧変動の負荷依存性, 出力依存性

PV 連系前後の電圧変動について検討する。ここで、電圧変動を (5) 式に示す。(4) 式に示した ΔV_{max} を最小とする力率 $\cos\theta$ を最適力率とした。

$$\Delta V_{max} = \max(|\Delta V_{P,S,n}|) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $V_{P,S,n}$: PV の出力 P 、負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]、 $V_{S,n}$: PV 連系前、負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

図 2 に亘長 10km の長距離配電線末端に出力を 0~2MW とした PV を連系した場合の最適力率 0.918 における PV 出力と電圧変動の関係を示す。

線路のインピーダンスは 2MVA ベースで $11.0 + j20.2$ [%] となり、出力 2MW、力率 1 の PV の連系により電圧は 11% (6.6kV 系統で 726V) 上昇する。電圧変動の観測箇所として、連系箇所(変電所より 10km 離れた地点) および PV 連系により最も電圧が低下した箇所(変電所より 6km 離れた地点) を選択した。

どちらの観測箇所においても PV 出力の増加とともに電圧変動のグラフは上に凸となった二次関数で示される曲線上を変化した。すなわち、PV 出力の上昇とともに電圧変動も上昇するが、PV 出力が 1MW を超えると、電圧変動は下降に転じる結果となった。また、負荷の増加とともに電圧変動のグラフは上方向に移動した。

図 3 に負荷と電圧変動の関係を示す。系統条件、負荷条件とも図 2 と同一とした。負荷の増加とともに電圧変動のグラフは傾きを正とした一次関数に近い形で変化した。また、電圧変動のグラフの傾きは同一 PV 出力であれば似通っていることがわかった。これより負荷の増加とともに電圧変動の値が上昇していることがわかる。図 2、図 3 のグラフより、以下の特性が明らかとなった。

- PV 出力の増加とともに、電圧変動は上へ凸状に変化(電圧変動は PV 出力の二次関数)
- 負荷の増加とともに、電圧変動は上昇(電圧変動は負荷の一次関数)

上記の特性の要因は線路電力損失変動の影響であり、線路のインピーダンスおよび PV 出力が増大するほど、この特性が強く表れることがわかった。

次節にて、この特性が表れる理由を説明する。

3.2 電圧変動と線路電力損失変動

図 1 に示したモデルシステムを基に、配電線亘長を L_L [km] とすると、PV 連系に伴うノード n の電

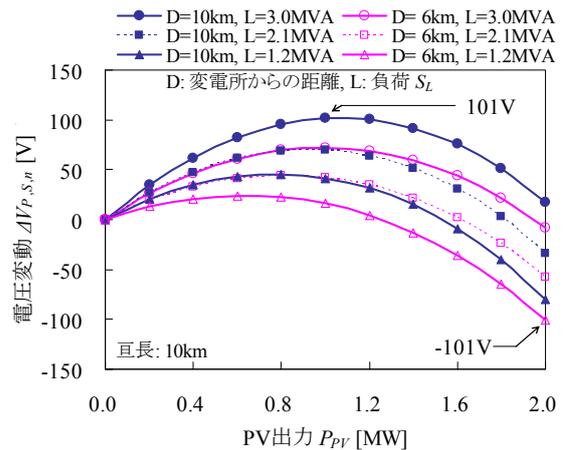


図 2 最適力率における PV 出力 P_{PV} と電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ の関係 (亘長 10km)

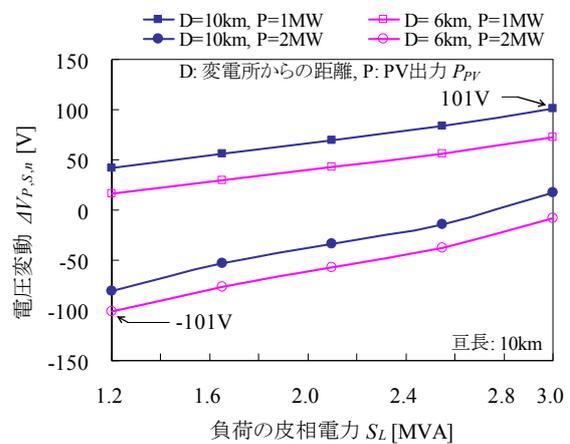


図 3 最適力率における負荷 S_L と電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ の関係 (亘長 10km)

圧変動 ΔV_n [V] は、変電所から kL_L ($0 \leq k \leq 1$) 離れた場所から配電線末端の間で生じる線路電力損失変動 ΔP_{Lossk} [W] および線路無効電力損失変動 ΔQ_{Lossk} [var] の影響を受けて (6) 式で表される。

配電線負荷 S_L [VA] は配電線に均等に分布していると想定すると、線路の電力損失変動 ΔP_{Lossk} は (8) 式で表される。(7), (9) 式より (10), (11) 式が得られ、 ΔV_n および ΔP_{Lossk} は出力 P_{PV} に対し二次関数として変化し、 P_{PV} の増加に伴い ΔV_n は低下、 ΔP_{Lossk} は上昇する (図 2, 図 4)。

また、(7), (9) 式より (12), (13) 式が得られ、 ΔV_n および ΔP_{Lossk} は負荷 S_L に対し一次関数として変化し、負荷の増加に伴い ΔV_n は増加、 ΔP_{Lossk} は減少する (図 3, 図 5)。

$$\Delta V_n \doteq \sum_{t=1}^n \frac{r(P_{PV} - \Delta P_{LOSS,t}) - x(Q_{PV} + \Delta Q_{LOSS,t})}{4V_t} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{4V_N} \left\{ n(rP_{PV} - xQ_{PV}) - \frac{r^2+x^2}{r} \sum_{t=1}^n \Delta P_{LOSS,t} \right\} \quad (7)$$

$$\Delta P_{LOSSk} = 3rL_L \int_k^1 [\{I_1(t)\}^2 - \{I_0(t)\}^2] dt \quad \dots\dots (8)$$

$$= \frac{rL_L(1-k)}{V_N^2} [(1+\alpha^2)P_{PV}^2 - (1-k)\{(1-a\alpha)P_L + b\alpha\}P_{PV}] \quad \dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta P_{LOSSk}}{\partial P_{PV}^2} = \frac{2rL_L(1-k)(1+\alpha^2)}{V_N^2} \quad \dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta V_n}{\partial P_{PV}^2} = \frac{-L_L(r^2+x^2)(1+\alpha^2)}{2V_N^3} \sum_{t=1}^n \left(1 - \frac{t}{4L_L}\right) \quad \dots(11)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{LOSSk}}{\partial S_L} \doteq -\frac{rL_L(1-k)^2(1-a\alpha)P_{PV}}{V_N^2\sqrt{a^2+1}} \quad \dots\dots(12)$$

$$\frac{\partial \Delta V_n}{\partial S_L} = \frac{L_L(r^2+x^2)(1-a\alpha)P_{PV}}{4V_N^3\sqrt{1+a^2}} \sum_{t=1}^n \left(1 - \frac{t}{4L_L}\right)^2 \quad (13)$$

ただし、 ΔV_n : ノード n における PV 連系前後の電圧変動 [V], $r+jx$: 線路インピーダンス [Ω/km], $\Delta P_{LOSS,t}$, $\Delta Q_{LOSS,t}$: PV 連系前後のノード t ~系統末端間における線路電力損失変動 [W], 線路無効電力損失変動 [var] (上位系, SVR, 連系 Tr 除く), $I_0(k)$, $I_1(k)$: 位置 k における PV 連系前, 連系後の電流 [A], L_L : 配電線亘長 [km], V_t : ノード t の電圧 [V], V_N : 6,600 [V], P_L , $Q_L (= -aP_L + b; a>0, b \geq 0)$: 負荷の有効電力 [W], 無効電力 [var], P_{PV} , $Q_{PV}(= \alpha P_{PV})$: PV の出力 [W], 無効電力 [var]

4. 力率変更制御

4.1 力率の制御法

従来手法である力率一定制御では 3 章の結果より, 連系箇所が変電所から遠く, PV の出力が大きい場合には線路電力損失変動が大きくなり, 電圧変動を十分抑制できないことがわかった。

このため, 提案する無効電力制御では, PV 連系時の線路電力損失変動に影響を与える PV の出力や配電線の負荷にあわせて, 電圧変動を最小にする PV の力率に都度変更する方法とした (力率変更制御)。

ここで, PV 連系箇所の電圧変動を最小にする

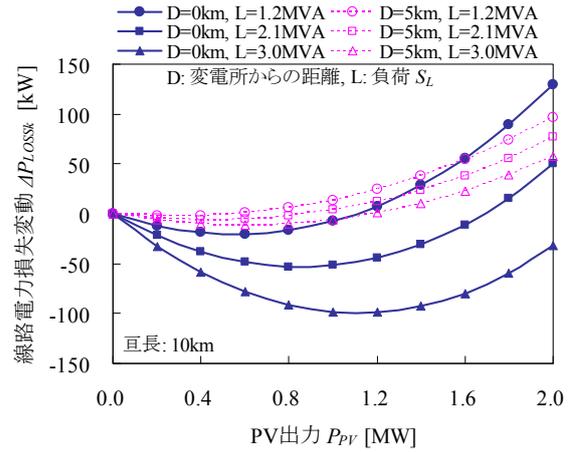


図 4 最適力率における PV 出力 P_{PV} と線路電力損失変動 ΔP_{LOSSk} の関係 (亘長 10km)

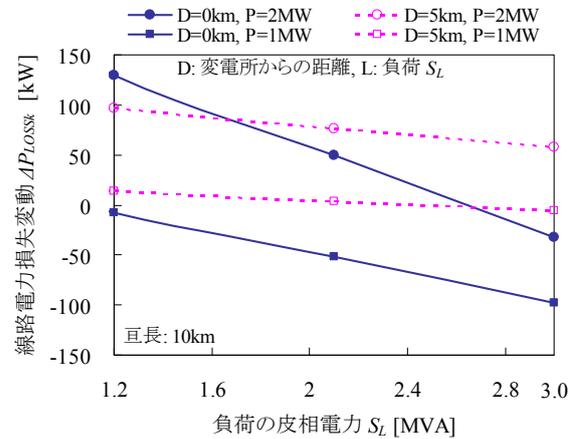


図 5 最適力率における負荷 S_L と線路電力損失変動 ΔP_{LOSSk} の関係 (亘長 10km)

よう PV の無効電力を調整すると, 線路電力損失変動の位置的なばらつきの影響を受けて配電線中間部で電圧が大きく低下することがあることから (図 7, 方式 2), 配電線全域の電圧変動が最小となるよう PV の無効電力を調整することとした。

制御の特徴を (14)~(17) 式に示す。

$$Q_{PV} = \alpha P_{PV} \quad \dots\dots(14)$$

$$\alpha = f(P_{PV}, S_L) \quad \dots\dots(15)$$

$$\Delta V_{max} = \max_{P,S,n} (|\Delta V_{P,S,n}|) \rightarrow \min. \quad \dots\dots(16)$$

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \quad \dots\dots(17)$$

ただし, P_{PV} , Q_{PV} : PV の出力 [W], 無効電力 [var] (正值), S_L : 負荷の皮相電

力 [VA], $V_{P,S,n}$: PV の出力 P , 負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V],
 $V_{S,n}$: PV 連系前, 負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

この制御方法は, (16) 式で表される ΔV_{max} を最小とすることを目的としている。運用にあたっては, 図 9, 図 10 のような, 系統条件に対応した出力別・負荷別の最適力率 $\cos\theta$ を求めておく必要がある。

4.2 力率変更制御(通信方式)

負荷の皮相電力の情報として, 変電所におけるフィード電流値を通信により発電事業者へ連携し, これを活用する方式について検討する。

図 6 に通信回線を使用した制御の概念図を示す。

(1) 各ノードの電圧変動

図 7 に亘長 10km の配電線末端に出力 2MW の PV を連系した場合の電圧変動を方式 1, 方式 2 の例で示す。変電所から 5km の地点に SVR を設置した。

方式 1 では (16) 式に示された提案手法を適用し, 電圧が最も上昇する箇所の電圧変動と電圧が最も低下する箇所の電圧変動を同程度とし, 配電線全域で生じる電圧変動が最小となるよう PV の力率を設定した。方式 1 において負荷別に電圧変動を比較すると, 負荷 0MVA において上昇・低下側とも電圧変動が最大であった。

連系箇所において系統の中で電圧が最も上昇し, その値は 55V となった。変電所より 1.5km 離れたノードにおいて系統の中で電圧が最も低下し, その値は 57V となった。

参考として, 方式 2 として PV の連系箇所の電圧変動が最小 (0V) となるよう力率を調整する方法も計算した。この場合, 連系箇所より電源側のノード (5km) で電圧が大きく低下した (-78V)。

配電線上の各ノードの電圧変動が配電線位置に対して非直線状に変化している理由は PV の連系により増減した線路電力損失の影響と考えられる。以降の検討では方式 1 を適用し, 検討を進めることとした。

図 8 に亘長 20km の配電線末端に出力 2MW の PV を連系した場合の電圧変動を示す。負荷 0MVA

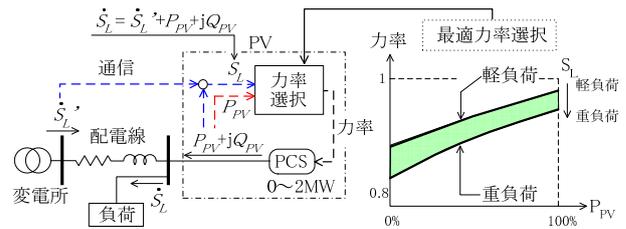


図 6 提案手法の概念図 (通信方式)

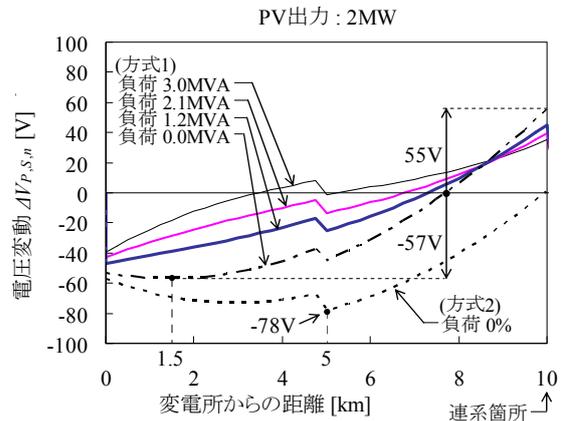


図 7 各ノードにおける電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ (亘長 10km)

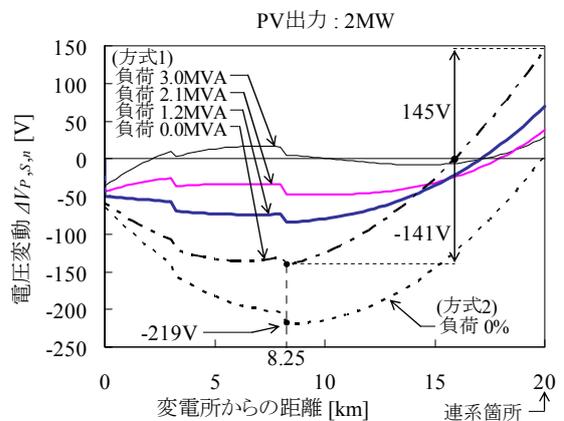


図 8 各ノードにおける電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ (亘長 20km)

のケースで電圧変動幅 ΔV_W は 286V に拡大した。電圧変動幅 ΔV_W は (18), (19) 式で定義する。

$$\Delta V_W = \max_{P,S,n} (\Delta V_{P,S,n}) - \min_{P,S,n} (\Delta V_{P,S,n}) \quad \cdots(18)$$

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \quad \cdots(19)$$

ただし, $V_{P,S,n}$: PV の出力 P , 負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V],
 $V_{S,n}$: PV 連系前, 負荷の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

(2) PV の最適力率

図 9 に負荷 0~3MVA, 亘長 10km の配電線末端に定格出力 2MW の PV を連系する場合, 配電線全域で生じる電圧変動を最小とする PV の最適力率 $\cos\theta (= \cos(\tan^{-1} a))$ を示す。PV 出力の増加, 負荷の減少とともに最適力率は増加する。

図 10 に亘長 20km のケースを示す。最適力率の適用範囲は亘長 10km のケースと比較して拡大した。

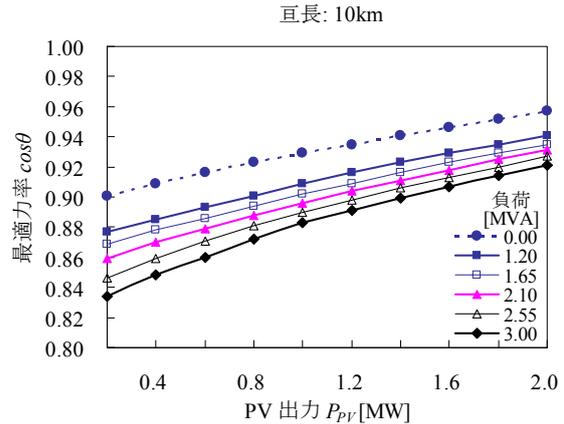


図 9 PV 出力 P_{PV} と PV の最適力率 $\cos\theta$ の関係 (亘長 10km)

(3) 線種別の電圧変動

高圧線の線種として ALOC120mm² と ALOC 58mm² を適用した場合の電圧変動幅の比較を図 11 に示す。

負荷は 2MVA とし, 配電線末端に定格出力 2MW の PV を連系した。ALOC120mm² と ALOC 58mm² のインピーダンスの R/X 比はそれぞれ 0.6, 1.1 であり, 亘長 10km における力率一定制御時の最適力率はそれぞれ 0.93, 0.81, 力率変更制御時の力率はそれぞれ「0.87~0.95」, 「0.70~0.84」の範囲となった。

ALOC58mm² における力率一定制御時, 力率変更制御時の電圧変動幅 ΔV_W は, 同一亘長 (L_{PV}) で比較した場合, 共に ALOC120mm² の約 2 倍となっており, 線路電力損失変動 ΔP_{Lossk} が大きくなくなったことが原因と考えられる。

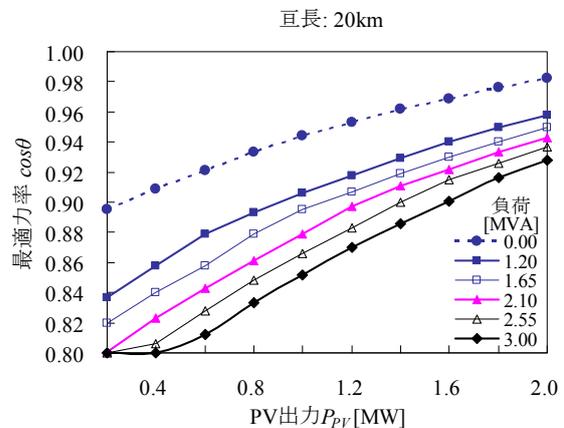


図 10 PV 出力 P_{PV} と PV の最適力率 $\cos\theta$ の関係 (亘長 20km)

4.3 力率変更制御(ロードカーブ方式)

負荷の皮相電力の把握方法として, 過去実績に基づき, 負荷(フィーダ電流)の季節別・時刻別のロードカーブを適用した方式(ロードカーブ方式)を検討した。ロードカーブはフィーダ電流の季節別・時刻別の平均値とし, 電気事業者から発電事業者へ定期的に連携されることを想定した。

図 12 に, 2011 年 4 月から 2012 年 3 月までの 1 年間について, 四国電力株のある支店管内における季節別・時刻別フィーダ電流実績の 126 フィーダの平均値(ロードカーブ)を示す。フィーダ電流の年間平均値 I_{AVE} , 標準偏差 σ より, $I_{AVE} + 2\sigma$ をフィーダ電流の最大値とみなして, これを基準(1pu)とした。ロードカーブの最大値は 87% (冬期), 最小値は 55% (秋期) となった。

図 13 に夏期のロードカーブにおける時刻別の「平均値」および「平均値+ σ 」, 「平均値- σ 」の値を示す。標準偏差 σ の 24 時間平均値は春期に

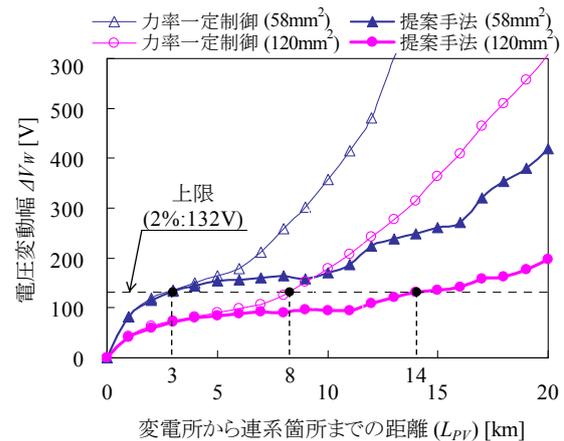


図 11 電圧変動幅 ΔV_W の比較 (ALOC 120mm², ALOC58mm²)

12%, 夏期に 13%, 秋期に 11%, 冬期に 14% となった。

この実績値を基に, シミュレーションでは負荷

の目標値であるロードカーブはフィード最大電流に対し 55%~85%の範囲で変動し、実負荷は目標値（ロードカーブ）に対し±15%の範囲で変動することとした。すなわち、負荷の目標値が 85%の場合、実負荷は 70%から 100%の範囲で、負荷の目標値が 55%の場合、実負荷は 40%から 70%の範囲で変動するものとした。

次節にて、亘長と電圧変動幅の特性を示す。

4.3 電圧変動幅の比較(従来方式, ロードカーブ方式, 通信方式)

図 14 に負荷を 1.2~3MVA とし、配電線末端に定格出力 2MW の PV を連系した場合の従来手法と提案手法における電圧変動幅 ΔV_W の比較を示す。提案手法として、「ロードカーブ方式」、「通信方式」、「負荷情報を取得しない方式」の 3 方式で計算を行った。

許容電圧変動幅を 2% (132V) とすると、従来手法である力率一定制御では連系箇所が変電所より 7.5km 離れた地点で限度に到達した。

一方、通信方式を用いた力率変更制御ではこれに相当する連系箇所は変電所より 18km 離れた地点となり、メガソーラーの連系可能な配電線の適用範囲が大幅に拡大した。通信を用いずロードカーブ方式を適用した場合には 12km 離れた地点で限度に到達した。通信回線の遮断などにより、負荷状況が確認できない場合は連系箇所が変電所より 9.5km 離れた地点で限度に達し、適用範囲の拡大は限定的であることがわかった。

5. まとめ

長距離配電線に連系したメガソーラー発電の電圧変動対策として、出力や配電線負荷に応じて力率を変化させる力率変更制御について検討を行った。モデルシステムを用いて電圧変動抑制効果を確認したところ、現在普及している力率一定制御と比較して大幅に電圧変動が抑制されることがわかった。

また、力率変更制御のもと、PV の連系に伴い生じる電圧変動は出力と変電所から連系箇所の距離に依存する。許容電圧変動幅を 2% とすると、出力 2MW のメガソーラー発電であれば、変電所から連系箇所までの距離が通信方式では 18km まで、ロードカーブ方式では 12km まで連系可能であることがわかった。

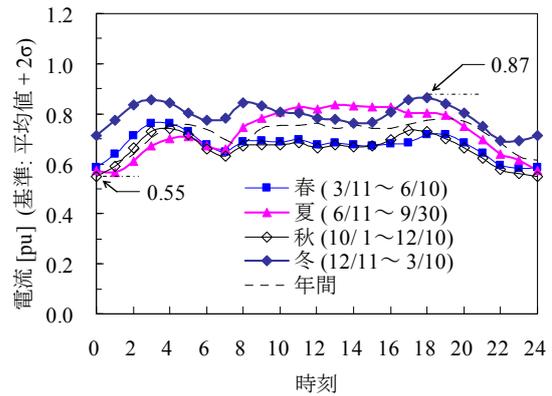


図 12 ロードカーブ

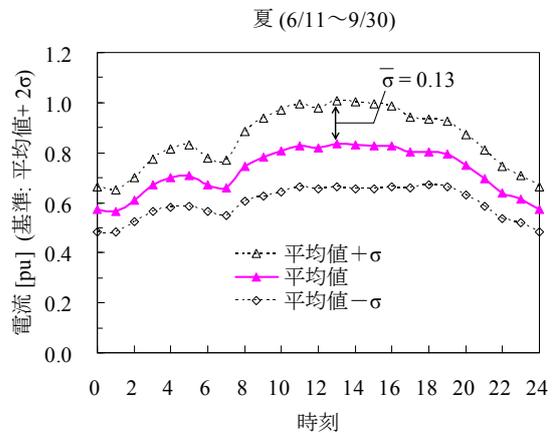


図 13 夏期のロードカーブ

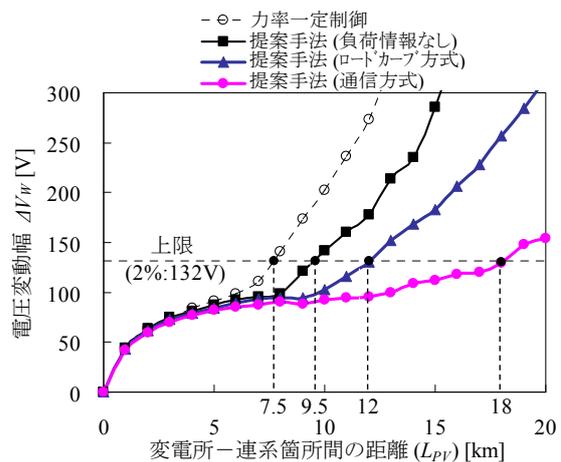


図 14 従来手法と提案手法の電圧変動幅 ΔV_W の比較

さらに負荷情報は重要であり、負荷情報を活用しない場合には、連系可能な距離は 9.5km に限定されることもわかった。

今後は実系統等により力率変更制御による電圧変動抑制効果の検証を行う予定である。

【謝辞】

本研究は、四国電力株式会社お客さま本部配電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) 川口直樹, 棚田一也, 堅田広司, 高崎昌洋: 「風力発電所連系時の連系点力率一定制御による電圧変動対策」, 平成 19 年電気学会全国大会, No.6-058 (2007-3)
- 2) 田中俊輔, 鈴木宏和: 「分散形電源の自律分散制御による電圧補償制御方式の検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.7, pp.869-879 (2009-7)
- 3) 石丸雅章, 田町英樹, 駒見慎太郎: 「電力系統における PV 常時進み定力率運転の効用」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.7, pp.615-622 (2012-7)
- 4) 細川充海, 石丸雅章: 「メガソーラー連系による配電線電圧上昇の抑制に関する考察」, 平成 24 年電気学会全国大会, No.6-131 (2012-3)
- 5) 横田耕作, 羽田野伸彦: 「堺メガソーラーの系統電圧への影響評価と対策機能の検証」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.189 (2012-9)
- 6) 京極喜一郎, 細川充海: 「メガソーラーの常時進み定力率運転による電圧変動緩和効果」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.160 (2013-8)
- 7) 内山倫行, 宮田博昭, 伊藤智道, 小西博雄: 「大規模太陽光発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol.130, No.3, pp.297-304 (2010-3)
- 8) P.M.S. Carvalho, P.F. Correia, L.A.F.M. Ferreira, “Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 766 – 772, May 2008.
- 9) 河野高一郎, 広瀬正嗣, 橋本渉: 「メガソーラー発電システムの力率一定制御による配電系統の電圧変動対策の検討」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.127 (2012-9)
- 10) 河野高一郎, 中西英治, 永野賢朗, 長瀬只雄, 北條昌秀, 大西徳生: 「メガソーラー発電システムの力率一定制御による電圧変動抑制効果の実証」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.250 (2013-8)
- 11) K. Kouno, M. Hirose, W. Hashimoto, T. Nagase, M. Hojo, T. Ohnishi, “Effectiveness of Constant Power Factor Control of Mega-solar System for Voltage Regulation with Long Distribution Line”, *The 10th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 317- 322, Kitakyushu, Japan, Apr. 2013.
- 12) 河野高一郎, 中西英治, 永野賢朗, 北條昌秀: 「長距離配電線に対応したメガソーラー発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.5, pp. 1-14 (2015-5)
- 13) Kouichiro Kouno, Tsuyoshi Sogabe, Katsushi Itou, and Masahide Hojo: “Study on Reactive Power Control of Large-Scale Photovoltaic System for Voltage Regulation with Long Distribution Line”, *Proceedings of IEEE PowerTech Eindhoven 2015*, Eindhoven, the Netherlands, Jun. 2015.

四国に影響を及ぼす降下火山灰に関するシミュレーション解析

(株)四国総合研究所 土木技術部	辻 智大
(株)四国総合研究所 土木技術部	池田 倫治
(株)四国総合研究所 土木技術部	加藤佐代正
四国電力(株) 土木建築部	西坂 直樹
四国電力(株) 土木建築部	大西 耕造

キーワード： 降下火山灰
シミュレーション
TEPHRA2
由布岳
九重山
阿蘇山

Key Words : air-fall ash
Simulation
TEPHRA2
Yufu Volcano
Kuju Volcano
Aso Volcano

Simulation analysis for air-fall ash influences on Shikoku Island.

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Tomohiro Tsuji, Michiharu Ikeda, Sayomasa Kano

Shikoku Electric Power Co., Civil Department

Naoki Nishizaka, Kozo Onishi

Abstract

If the large volcanic eruption occurred at a volcano on Kyushu, the volcanic ash would be transported to Shikoku by the westerlies and affect to electric facilities at the downwind region, although there is no volcano in Shikoku. Especially for nuclear power plants, it is necessary to assess the ash fall hazard to the facilities, considering the targeted volcanoes. The thickness of volcanic ash around Ikata Power Plant has been evaluated to be almost 0 cm based on geological survey. However, it is expected that the ash thicker than a few cm will be fallen on the Ikata site, depend on wind direction. Then we carried out the analytical study using TEPHRA2, simulations of tephra dispersal.

The tephra fall hazard from a future eruption at Yufu, Kuju and Aso volcanoes are simulated. The most effective eruption to the site is the VEI5 eruption from Kuju Volcano (Kj-P1, the eruption mass is 2.03 km³). Based on the calculation using the average wind of each month, the average thickness of the ash fallen on the site is 0.5 cm. The ash fallen on September was thickest (2.2 cm) in twelve months.

In the case that the wind blows from the vent to the site, 4.5 cm-thick-ash fallen on the site. Given that the eruption mass being 6.2 km³, the ash of 6.9 cm-thick deposited at the site.

1. はじめに

四国には火山が分布しないものの、風上に位置する九州の火山が大規模な噴火を起こした場合には、偏西風に乗って四国へ火山灰が降下し、各種電力設備に影響を及ぼす可能性がある。特に原子力発電所の安全対策には万全を期すことが必須であり、原子力規制委員会制定の「原子力発電所の火山影響評価ガイド」において、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出して発電所運用期間中の噴火規模に対応する降下火山灰を考慮することが求められている。

降下火山灰による影響評価においては、まず敷地付近の地質調査により評価を行うが、敷地南東の宇和盆地における UT コア（守田ほか、2014）など連続的な堆積物中にも考慮する過去の噴火と対応する火山灰層が認められないため、敷地付近への火山灰の降下厚さはいずれもほぼ 0 cm と評価される。しかし、風向きによっては敷地において数 cm 以上の厚さの火山灰が降下することも想定される。そこで、気象条件の不確かさを考慮した火山灰降下リスクを評価するために、降下火山灰シミュレーションを用いた解析的検討を実施する。

2. 研究手法

本研究では、降下火山灰シミュレーションとして実績のある TEPHRA2 を利用する。TEPHRA2 は移流拡散モデル (Bonadonna et al., 2005) に基づいたシミュレーションであり、適当な初期パラメータを与えることによ

り、堆積物の分布を計算できる (萬年, 2013)。短時間で簡易的に計算することができるため、パラメータスタディおよび確率論的評価に適している。解析プログラムは南フロリダ大学のサイト (<http://www.cas.usf.edu/~econnor/vg@usf/tephra.html>) からダウンロードすることができる。計算には、噴火パラメータ、大気パラメータ、粒子パラメータ、グリッドパラメータの 4 つが必要となる。計算結果として、単位面積当たりの降灰量 (kg/m^2) とその粒度組成が得られる。

3. 伊方発電所と四国に影響を及ぼす可能性のある活火山の地理的關係

伊方発電所の風上に位置する九州中部～東部には、北東から南西に、鶴見岳・伽藍岳（敷地からの距離 85 km）、由布岳 (89 km)、九重山 (108 km)、阿蘇山 (131 km) などの活火山が分布している (Figure 1)。その中でも阿蘇山および九重山は過去に大規模な噴火をしており、九重山の噴火による火山灰は過去に四国にも降下している (熊原・長岡, 2002)。また、伊方発電所からの距離が比較的近い由布岳は中規模の噴火であるが火山灰を放出している。鶴見岳・伽藍岳は溶岩を放出する噴火を主体としており、遠方での火山灰の降下は報告されていない。そこで、本研究では、由布岳、九重山および阿蘇山の 3 火山を対象火山とし、それぞれの火山における既往最大の噴火を想定した降下火山灰シミュレーションを行った。

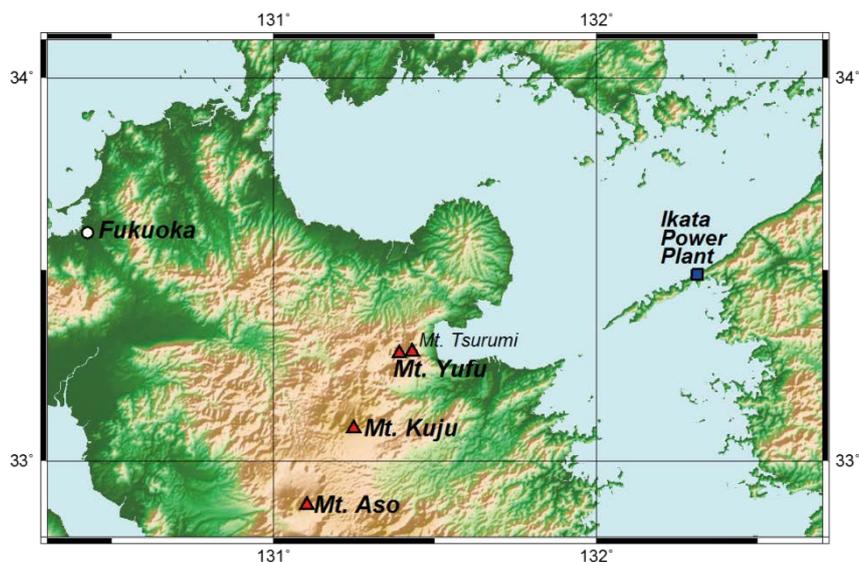


Fig. 1 Localities of Yufu, Kuju and Aso volcanoes with Ikata Power Plant.

4. 由布岳、九重山および阿蘇山の噴火による影響の検討

4.1. 検討方針

本検討では、まず、由布岳、九重山および阿蘇山の3つの火山の噴火による伊方発電所周辺での降灰層厚を算定し、それぞれの火山の噴火による伊方発電所周辺への影響を比較する。その後、伊方発電所への降灰に最も影響を及ぼす火山噴火についてケース検討を実施する。

4.2. 噴火パラメータ

それぞれの火山の既往最大噴火は、由布岳の2 ka 噴火（噴火年代約2000年前、降下火砕物の噴出量 0.05 km^3 （須藤ほか, 2007））、九重山の九重第一降下軽石（噴火年代約5.4万年前（川辺ほか, 2015）、噴出量 2.03 km^3 （須藤ほか, 2007））、阿蘇山の草千里ヶ浜降下軽石（噴火年代約3.1万年前、噴出量 2.39

km^3 （宮縁ほか, 2003））である（Table 1）。

由布岳2 ka 噴火は、噴火規模を示す爆発的噴火指数（Volcanic Explosivity Index, Newhall and Self, 1982）で表すと $\text{VEI} = 3 \sim 4$ となる。Newhall and Self (1982) によると、その規模の噴煙柱高さは $3 \sim 25 \text{ km}$ と推定される。同様に、九重第一降下軽石および草千里ヶ浜降下軽石の噴火規模は $\text{VEI} = 5$ 程度であり、噴煙柱高さは $20 \sim 35 \text{ km}$ と推定される。本検討では、由布岳による2 ka 噴火の噴煙柱高さを 15 km 、九重山および阿蘇山の噴火による噴煙柱高さを 25 km として降下火山灰シミュレーションを行った（Table 1）。

各火山噴火の粒子径（最大粒径、最小粒径、平均粒径および粒子分散）については、現時点で情報が得られていないため、ここでは、Bonadonna et al. (2005) に記載されている TEPHRA2 推奨値を適用した（Table 2）。

Table 1 Eruption parameters used in the simulations.

Volcanoes	Yufu	Kuju (Nakadake)	Aso (Nakadake)	References
Height above sea level (m)	1,583	1,791	1,506	Japan Meteorological Agency (2013)
Distance from Ikata site (km)	89	108	130	
Eruptive Mass (km ³)	0.05	2.03	2.39	Sudo et al. (2007), Miyabuchi (2011)
Plume Height (km)	15	25	25	Newhall and Self (1982)
Column Steps	100	100	100	
Maximum Grain Size (phi)	-10	-10	-10	Bonadonna et al. (2005) (Felsic: -10, Mafic:-7)
Minimum Grain Size (phi)	10	10	10	Bonadonna et al. (2005) (Felsic: 10, Mafic: 7)
Median Grain Size (phi)	1.0	4.5	4.5	Plinian eruption (Mount St Helens): 4.5 phi; Subplinian eruption: 1 phi (TEPHRA2 recommendation)
Sorting (phi)	1.5	3.0	3.0	Plinian eruption (Mount St Helens): 3; Subplinian eruption: 1.5 phi (TEPHRA2 recommendation)

4.3. 大気パラメータ

本検討では、至近 22 年間(1988~2010 年)の毎日午前 9 時の地表~高度約 30 km までの各高度 (hPa を高度に換算) の風向・風速観測値を月別に平均化した月別平年値 (気象庁「高層気象観測年報」) を使用した (Figure 2)。解析には、3 火山および伊方発電所に最も近い福岡における高層気象観測データを用いた (Figure 1)。我が国では、上空約 8~15 km

付近の対流圏上層にジェット気流と呼ばれる風速が大きい偏西風が流れている (Figure 2)。特に冬季には風速が大きく、平均的に 30 m/s 程度になり、中には 70 m/s 程度を超えることもある。なお、夏季は冬季の半分程度以下の風速となる。上述した 3 火山の上空においても、このジェット気流が流れていると考えられる。このため、火山が噴火した場合、火山灰がこのジェット気流により東方向に運搬さ

れ、季節によって降灰領域が変化することが予想される。

4.4. 粒子パラメータ

粒子パラメータの設定には、軽石密度、岩片密度、拡散係数 (Diffusion Coefficient)、落下時間の閾値 (Fall Time Threshold) および噴煙モデル等の各データが必要である。これらについては萬年 (2013) を参考にした (Table 2)。それぞれの噴火による影響を比

較するため、これらのパラメータを3つの火山で共通して用いた。

4.5. グリッドパラメータ

本検討では、国土地理院の数値地図 (50 mDEM) と産総研の数値地図 (1 kmDEM) を基に 2 km グリッドメッシュを作成し、これを利用した。なお、計算開始点は、噴火が既存の火口から始まると仮定した。火口の座標については気象庁 (2013) を参考にした。

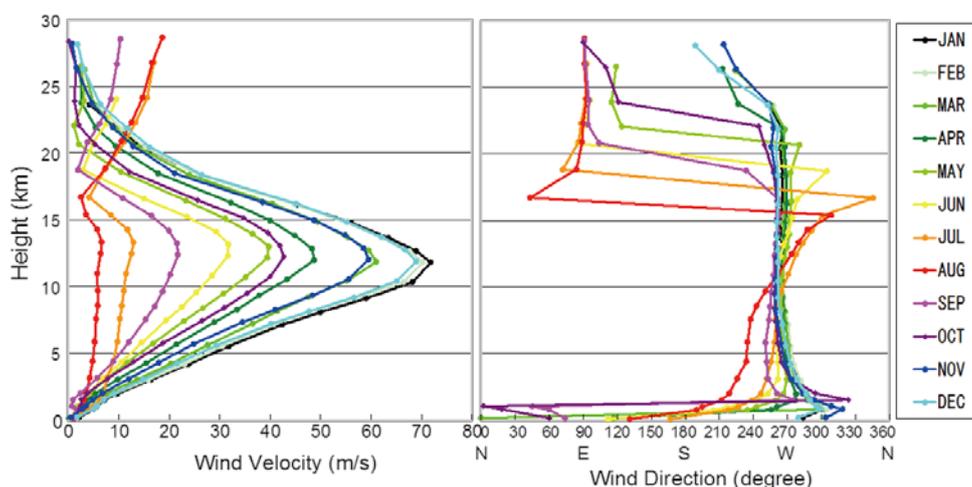


Fig. 2 Upper-air wind velocity (a) and wind direction (b) averaged every month sampled every 09:00 local time from 1 March 1989 through 31 December 2010 at Fukuoka (Fig.1a) (Japan Meteorological Agency, 2012).

Table 2 Grain parameters used in the simulations

Parameters	Unit	Value	References
Lithic Density	kg/m ³	2600	TEPHRA2 recommendation
Pumice Density	kg/m ³	1000	TEPHRA2 recommendation
Diffusion Coefficient	m ³ /s	200	Mannen (2013)
Eddy Constant	m ² /s	0.04	Suzuki (1983)
Fall Time Threshold	s	3600	Mannen (2013)
Plume Model		0 (uniform)	Mannen (2013)
Plume Ratio		0.1	TEPHRA2 recommendation

5. 由布岳、九重山および阿蘇山の噴火による影響の比較

由布岳、九重山、阿蘇山の噴火について、それぞれ月別平年値の風を用いて解析した結果の概要を Table 3 に示す。なお、各表における降灰層厚は、降灰の密度を 1000 kg/m^3 と仮定して換算した値である（例えば、降灰量 1 kg/m^2 だと降灰層厚は 0.1 cm となる）。

月別の解析の結果、冬季（11月～5月）における伊方発電所における降灰層厚は $0 \sim 0.2 \text{ cm}$ であり、夏季（6月～10月）と比較して、格段に薄い（Table 3）。この傾向は3つの火山噴火で共通していたため、九重山の噴火による結果のみを Figure 3 に示す。由布岳、九重山および阿蘇山の火山噴火による敷地での降灰層厚はそれぞれ月平均で 0.1 cm 、 0.5 cm および 0.2 cm であり、九重山の噴火で最大となり、阿蘇山、由布岳と小さくなっている

（Table 3）。伊方発電所における降灰層厚は、いずれの火山噴火でも9月に最大となり、由布岳、九重山、阿蘇山でそれぞれ 0.3 cm 、 2.2 cm 、 1.0 cm である（Figure 4）。3つの火山噴火による層厚が異なる要因としては、各火山と敷地との位置関係、噴火規模および風向が挙げられる。由布岳は3つの火山の中で最も伊方発電所までの離隔が小さいものの、噴火規模が小さいため、9月を含めた各月の平年風の風速では敷地に厚く降灰しない。阿蘇山は3つの火山の中で最も伊方発電所との離隔が大きく、位置が南に位置していることから、西風の卓越する冬季には敷地にほとんど降灰しない。また、西南西の風が卓越する9月においても降灰の中心は敷地より南側を向いているため、敷地での降灰は 1.0 cm に留まる（Table 3）。

Table 3 Calculated thickness of volcanic ash fallen on Ikata Power Plant. Yellow marker shows the maximum thicknesses.

Volcanoes		Yufu	Kuju	Aso
Thickness at Ikata Site (cm)	Jan	0.0	0.0	0.0
	Feb	0.0	0.0	0.0
	Mar	0.0	0.0	0.0
	Apr	0.0	0.1	0.1
	May	0.1	0.2	0.1
	Jun	0.2	0.6	0.2
	Jul	0.2	1.5	0.7
	Aug	0.0	1.1	0.7
	Sep	0.3	2.2	1.0
	Oct	0.2	0.2	0.1
	Nov	0.0	0.1	0.0
	Dec	0.0	0.0	0.0
	Average	0.1	0.5	0.2

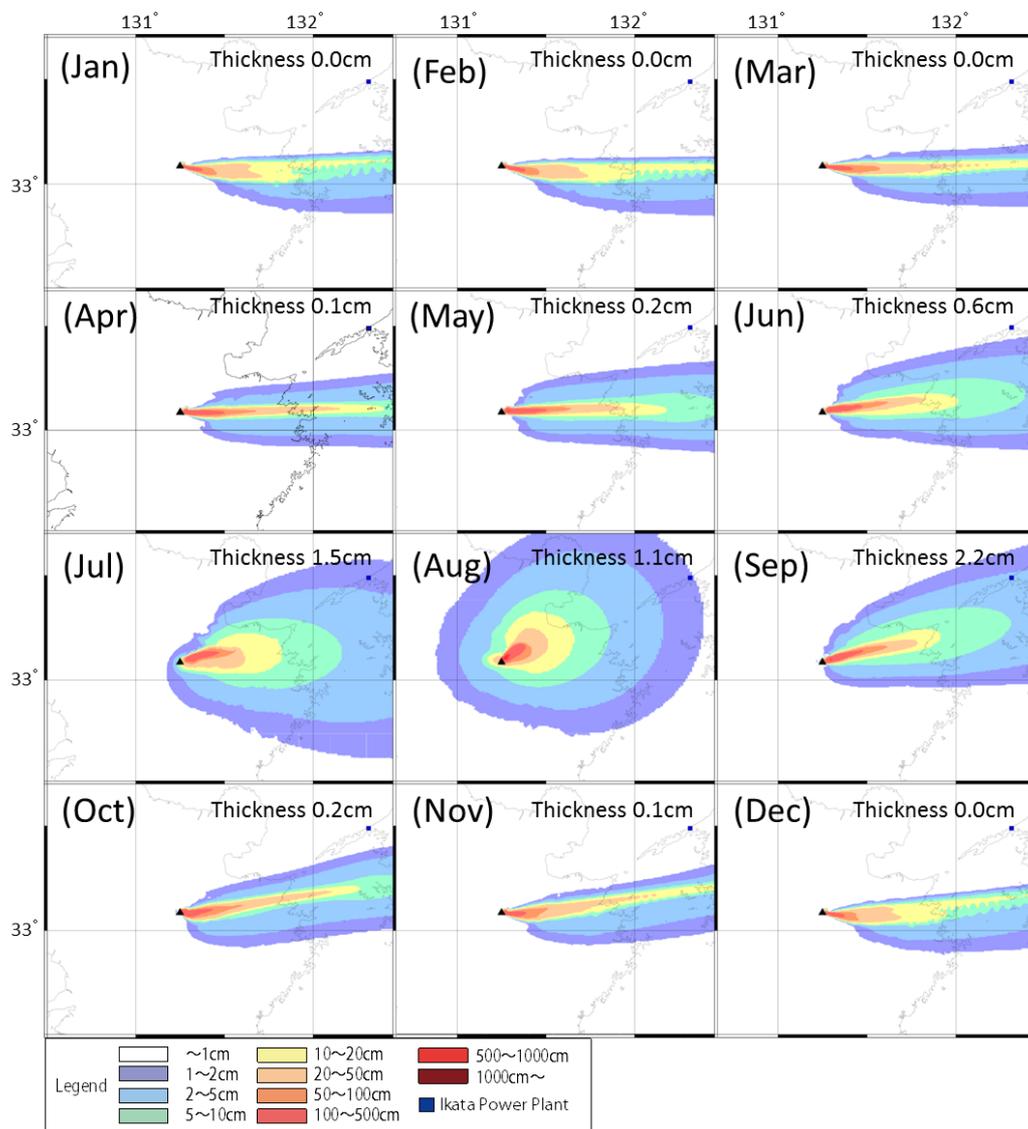


Fig. 3 Isopack maps of ash from Kuju computed for each month.

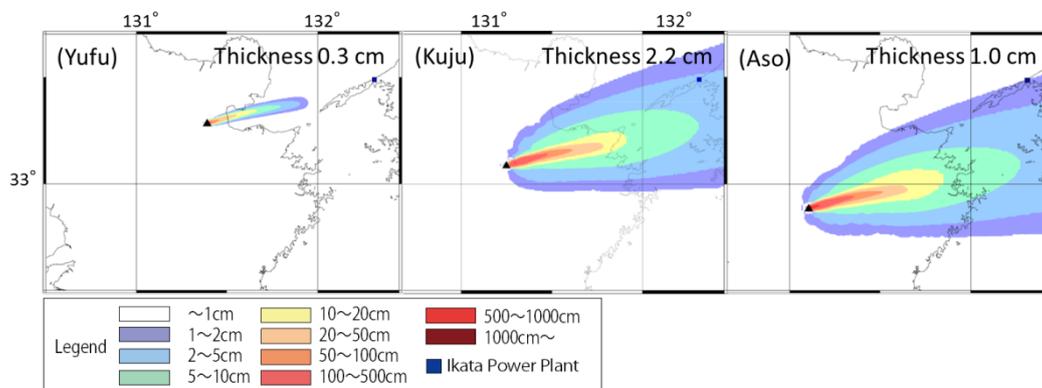


Fig. 4 Isopack maps of ash deposits from Yufu, Kuju and Aso computed for September.

6. 九重山における噴火・大気パラメータの検討

敷地への降灰に最も影響が大きい九重山の噴火に関し、噴煙柱高度および噴出量等の噴火パラメータ、大気パラメータを変化させたケース検討を行い、各パラメータの影響について考察し、敷地周辺における火山灰層厚の評価を行う。その際、12ヶ月のうち、敷地で最も厚い火山灰厚さとなる9月の風を用いた降下火山灰シミュレーションを基本ケースとする (Table 4)。

6.1. 噴煙柱高度のケース検討

九重第一降下軽石を放出した噴火は VEI = 5 であり、その噴煙柱高さは~25 km と推定される。ただし、同程度の規模の噴火であっても、噴煙柱高度はばらつきの大きいパラメータであることから、基本ケースである 25 km から ±5 km 変化させたケース検討を行った (Table 4)。以下の検討で用いた粒子パラメータは Table 2 と同じである。

6.2. 噴出量のケース検討

九重第一降下軽石の噴火規模については、これまで火山灰の等層厚線図を基に噴火規模を見積もった須藤ほか (2007) による 2.03 km³ が示されてきた。しかし近年、長岡・奥野 (2014) は給源付近における層厚分布のデータを拡充し、算出方法は示していないものの、九重第一軽石の噴火規模として 6.2 km³ を提案した。自然現象の評価と将来予測には不確かさが残るため、噴出量を基本ケースの 2.03 km³ 対して大きく見積もった場合の噴出量 6.2 km³ を用いて検討を行った (Table 4)。

6.3. 風向・風速のケース検討

実際の気象条件を考えると、風速を固定したまま風向のみを変化させることは現実的ではない。そこで、高層気象観測年報の9月の平年風から、敷地方向に吹く風を抽出し、それらを平均化して仮想的な風を作成して風向の影響を検討した (Table 4)。尚、風速のばらつきの影響を検討するため、高層気象観測年報の9月の平年風から、風速を ±1σ 変化させた検討も行った (Table 4)。

Table 4 Eruption and atmospheric parameters used for parameter studies. Yellow markers show the tested parameters in each case.

Cases	Primal Case	Plume Height Study	Eruption Mass Study	Wind Direction Study	Wind Velocity Study
Plume Height (km)	25	20, 30	25	25	25
Eruption Mass (km ³)	2.03	2.03	6.2	2.03	2.03
Wind Direction	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Blow to Ikata	Ave. Sep.
Wind Velocity	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	+/- 1 sigma of Ave. Sep

7. 結果

7.1. 噴煙柱高度の検討

噴煙柱高度を変化させた結果を比較すると、噴煙柱高さ 20 km の場合でも 25 km の場合でも、伊方発電所における降灰層厚は 2.2 cm で変わらない (Figure 5)。噴煙柱高度 20 km の結果の方が噴煙柱高度 30 km 結果よりも、厚く降灰する領域 (例えば層厚 25 cm 以上の領域) が遠くまで及んでいるものの、全体的な傾向としては、噴煙柱高度 20~30 km の範囲では、噴煙柱高度の変化が降灰層厚分布に及ぼす影響は比較的小さい (Figure 5)。

7.2. 噴出量の検討

噴出量を 6.2 km³にした場合、9月の平年値の風で敷地周辺における層厚は 6.9 cm となった (Figure 6)。噴出量 2.03 km³の場合、敷地での降灰層厚は 2.2 cm であり、噴出量の変化とともに層厚も基本ケースのおよそ 3 倍程度となった。

7.3. 風向・風速の検討

風速を変化させて、敷地周辺に堆積する火山灰層厚がどのように変化するか検討した。基本ケースの風速-1 σ および+1 σ の場合、敷地での降灰層厚はそれぞれ 2.6 cm および 1.4 cm となった (Figure 7)。基本ケースでは、層厚分布の軸は敷地よりやや南側を通っており、軸から離れるほど降灰層厚は薄くなる。風速を-1 σ 小さくした場合、基本ケースよりも降灰分布の幅が広がるため、基本ケースよりも敷地における降灰層厚が厚くなった。一方、風速を+1 σ 大きくした場合、基本ケースよりも狭小な降灰分布となるため、軸から離れると層厚が極端に薄くなり、敷地における降灰層厚が薄くなった。

風向が敷地向きとなる仮想的な風を想定した場合、敷地周辺における層厚は 4.5 cm となった (Figure 8)。風向が層厚に大きく影響することを確認できた。

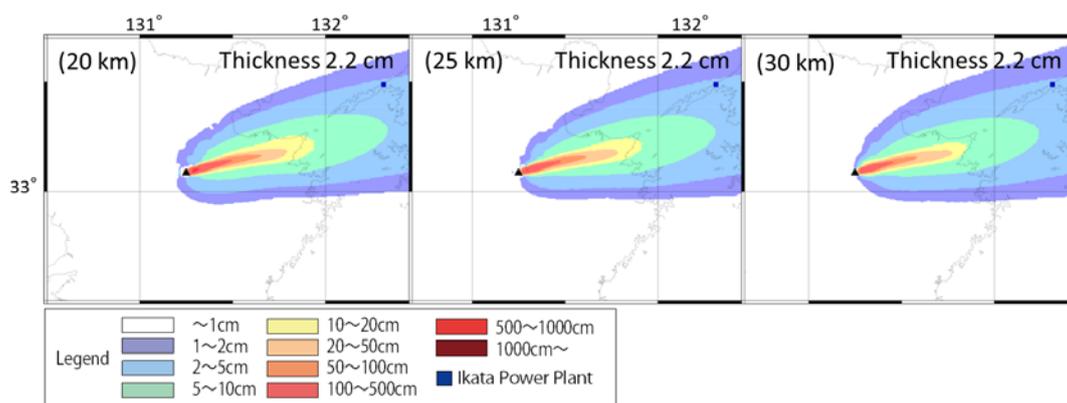


Fig. 5 Isopack maps of ash from Kuju computed for column heights of 20, 25 and 30 km.

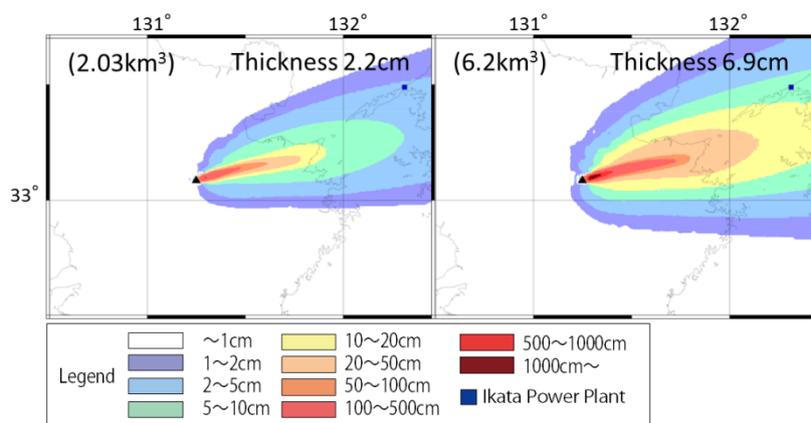


Fig. 6 Isopack maps of ash from Kuju computed in the case of 2.03 km³ (left) and 6.2 km³ mass volume (right).

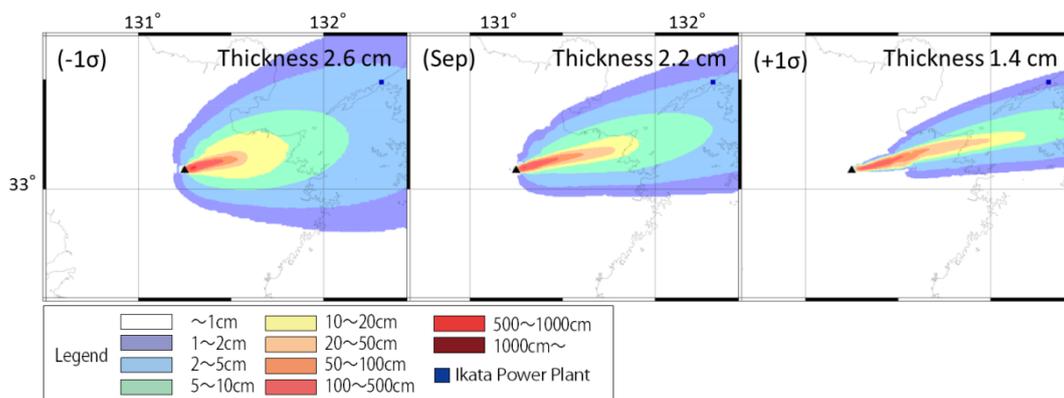


Fig. 7 Isopack maps of ash from Kuju computed for the wind of slower (-1σ from average wind of September) (left), of September and of faster ($+1\sigma$ from that of September) (right).

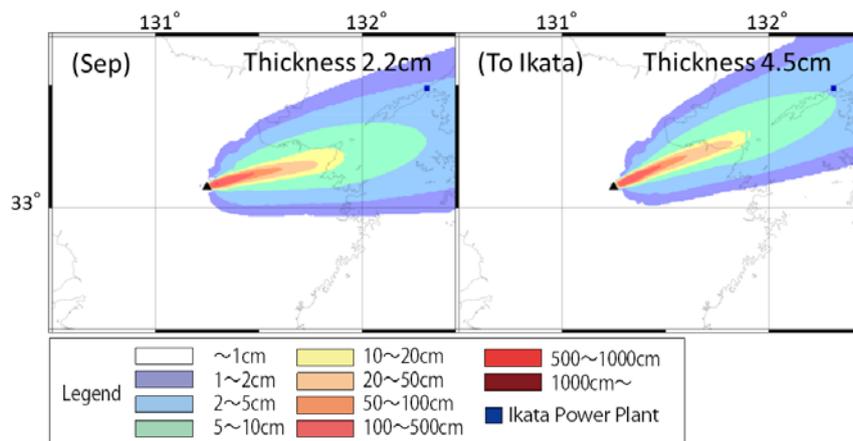


Fig. 8 Isopack maps of ash from Kuju computed for the average wind of September (left) and of the day when the wind blow to Ikata Power Plant (right).

8. 考察

今回実施した九重山の噴火に関する検討ケースの中で、降灰層厚分布に大きく影響するパラメータとして、風向・風速および噴出量が挙げられる。噴出量を 2.03 km^3 から 6.2 km^3 へ約 3 倍にすると、降灰量は単純に約 3 倍になった (Figure 6)。しかし、風向が敷地方向へ向かなければ、たとえ噴出量が 6.2 km^3 であっても降灰層厚はほぼ 0 cm である。そういった意味では、敷地における降灰層厚に最も影響を与えるパラメータは風向・風速である。特に風向による影響が大きい、風向と風速は相互に関連しているため、両者を独立して扱うことはできない。

例えば、冬季は強いジェット気流の影響で指向性が強くなり、層厚分布が狭小となるため、火山灰が厚く堆積する領域は少なくなる。これに加えて、西～西北西の風で安定することにより (Figure 2)、伊方発電所より南側へ降灰する (Figure 3)。それに対して、夏季はジェット気流が弱まり、風向がばらつくため、火山灰が堆積する領域は広がる。一方で、風速が弱まるため、火山灰が厚く堆積する領域は火口近傍 (九州付近) に留まる傾向がある (Figure 3)。9月の風は、Figure 2 に示す通り、高度 15 km より低い標高の風がほぼ一様に 240° (北方から時計回りの角度) より若干大きい方角から吹いていることから、この方位の風下側に位置する伊方発電所の降灰層厚に大きく影響していると考えられる。

本研究では、地表から高度約 30 km までを 25 程度の高度に区切って計測された気象庁の風向・風速データを用いたが、各高度において風向が敷地方向に揃うというのは極めて稀な気象条件であり、実際には高度毎の風向・風速は不揃いである。そのため、火口か

ら東北東方向に 108 km 離れた伊方発電所に火山灰が厚く堆積する可能性は極めて低い。

また、TEPHRA2 では、ジェット気流だけでなく、それより低層の風の変化も結果に大きく影響する。これは TEPHRA2 が均質な噴煙柱を想定しており、そこから火山灰粒子が一樣の落下速度で落下しながら、各標高に仮想した水平層における風向・風速の元で拡散することに起因している。すなわち、ジェット気流の風は噴煙柱の高層から落下した粒子のみに影響を与えるが、低層の風は噴煙柱の低層から落下した粒子にも高層から落下した粒子にも影響を与えるためである。

噴煙柱高度は、降灰量分布にはさほど大きく影響しなかった (Figure 5)。これは、高度 20 km 以上では風速が小さいため、 20 km 以上における噴煙柱高度の変化が結果に影響しにくいと考えられる。しかし、本来は噴煙柱高度が高くなるということは噴出率が大きくなり、傘型噴煙を形成することでより広域に火山灰が広がる事が考えられる (例えば、1991年 Pinatubo 噴火)。当然、それによって降灰量分布も変わるはずである。TEPHRA2 ではこういった傘型噴煙からの粒子の落下を模擬できていないことが指摘されており、現在解析コードの改善が進められているところである (萬年, 2013)。噴煙柱高度の設定については、今後、野外での噴出物の粒度分布に基づき推定する (Carey and Sparks, 1986) ことが重要である。

9. まとめ

伊方発電所の火山影響評価においては、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出して、発電所運用期間中の噴火規模に対応する降下火山灰を考慮する必要がある。そこで、

考慮対象である由布岳、九重山および阿蘇山の噴火について、月別平年値の風で降下火山灰シミュレーションを行った結果、伊方発電所に最も影響のある噴火は九重第一降下軽石（噴出量 2.03 km³）であり、敷地における降下火山灰厚さは月平均で 0.5 cm、最大である 9 月の平年値の風で 2.2 cm であった。また、正確な見積もりが難しいことや最近の研究動向を踏まえて噴出量 6.2 km³ と噴火規模を大きく見積もった場合、最大である 9 月の平年値の風で敷地における降下火山灰厚さは 6.9 cm であった。さらに、敷地方向に吹く仮想的な風を考慮した場合、敷地における降下火山灰厚さは 4.5 cm であった。

四国西部には伊方発電所以外にも多数の電力設備が立地しており、本研究で示した降下火山灰シミュレーション結果は、送電鉄塔、変電所、水力発電所等において火山影響評価を行う上でも有用である。今後、九重第一軽石について、給源近傍における降下火山灰厚さ、粒度分布を詳細に把握するとともに、四国南西部宿毛市において報告された九重第一軽石の産状についてデータを拡充し、フィールドデータに基づき降下火山灰シミュレーションを高度化していくことが重要である。

[謝辞]

本研究を実施するにあたり、神奈川県温泉地学研究所の萬年一剛博士および西日本技術開発株式会社の稲倉寛仁博士に TEPHRA2 についてご教示頂いた。また、長崎大学故長岡信治教授および電力中央研究所の三浦大助博士には降下火山灰に関してご教示をいただいた。㈱四国総合研究所の鈴木富美子氏には TEPHRA2 解析および図化に御協力いただいた。ここに記して深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 守田益宗・須貝俊彦・古澤 明・大野裕記・西坂直樹・辻 智大・池田倫治・柳田 誠, 2014, 宇和盆地の花粉分析からみた MIS15 以降の植生変遷史, 植生史研究, 23, 3-19.
- 2) Bonadonna, C., C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing, and T. K. Hincks, 2005, Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03203, doi:10.1029 / 2003JB002896.
- 3) 萬年一剛, 2013, 降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の理論と現状—第四紀学での利用を視野に, 第四紀研究, 52, 173-187.
- 4) 熊原康博・長岡信治, 2002, 四国南西部, 松田川流域における九重第一テフラの対比と低位段丘の年代, 第四紀研究, 41, 213-219.
- 5) 須藤茂・猪股隆行・佐々木寿・向山栄, 2007, わが国の降下火山灰データベース作成, 地質調査研究報告, 58, 261 - 321.
- 6) 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子, 2015, 九重火山地質図. 火山地質図 19, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 7) 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐勝, 2003, 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物, 火山, 48, 195-214.
- 8) Newhall, C. G. and Self, S., 1982, The

- volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C2), 1231-1238.
- 9) 気象庁編, 2013, 日本活火山総覧 (第 4 版), 気象業務支援センター.
- 10) 気象庁編, 2012, 高層気象観測年報, 気象業務支援センター.
- 11) Suzuki, T., 1983, A theoretical model for dispersion of tephra. In Shimozuru, D. and Yokoyama, I. (Eds) *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, 95-116.
- 12) 長岡信治・奥野充, 2014, 九重火山のテフラ層序, *月刊地球*, 36, 281-296.
- 13) Carey, S. N. and Sparks, R. J., 1986, Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48, 109-125.

植物生体情報計測用の組み込み型画像処理技術の開発について

(株)四国総合研究所 電子技術部 松浦英樹 中西美一 仲田 誉
電気利用技術部 山本敬司

キーワード： 植物生体情報計測
画像処理
HSV モデル
2 値化
組み込みシステム
OpenCV
Java
葉のしおれ

Key Words : Measurement of plant biological information
Image processing
Hue Saturation Value model
Binarization
Embedded system
OpenCV
Java
leaf wilting

Development of embedded image processing technology for measurement of plant biological information

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Hideki Matsuura, Yoshikazu Nakanishi, Homare Nakata

Electricity Applied Technology Department

Keiji Yamamoto

Abstract

Recent advanced computing and image sensing technologies have been allowing us to build the high performance and low cost plants' image capture and analysis systems which can be used for various purposes, for example plants' growing monitoring.

We have developed a image capture and analysis system based on those modern technologies, and have applied it to measure the degree of leaf wilting of tomato plants in collaborating with Ehime University agricultural research division. The measurement results gotten through the experiments were as precise as our former expectation.

High quality tomato fruits production requires special watering technique based on the degree of leaf wilting of tomato plants. It has been considered impossible to automate those special watering technique because of that the degree of leaf wilting could only been observed by human eyes.

The newly developed image capture and analysis system seems to be useful to achieve the watering automatization on the production of high quality tomato fruits.

1. はじめに

近年、CPU性能やメモリ搭載量および周辺機能の強化された低価格で高性能な組み込み用コンピュータ（シングルボードコンピュータ）が開発され、また、安価な市販のUSBカメラを用いることで、100万画素以上の十分な空間分解能を持つ画像計測システムの構築が可能となってきた。¹⁾

当社では、農業用温室内の環境条件を高精度かつ低コストに遠隔モニタリングすることを可能とする「栽培環境モニタリングシステム」（ハッピー・マインダー:HaPPiMinder）を開発・販売しており、オプションカメラによる植物体の定期静止画像撮影も可能となっている（図1）。

今のところ、得られた静止画像の活用は栽培記録程度に止まっているが、定期撮影された静止画像から植物の生育状況を判断する上で有用な画像情報を画像処理技術により自動抽出し、数値データとして収集・蓄積できれば日常の栽培管理の合理化ならびに栽培技術のマニュアル化に大きく役立つのではないかと考え、ハッピー・マインダーに組み込むことのできる植物生体情報計測用画像処理技術の開発を進めている。

本技術には様々な応用が考えられるが、例えば、愛媛大学農学部において先進的な研究が進められている、高糖度トマト栽培における水やりの自動化への適用があり、現在、画像処理機能を搭載したハッピー・マインダーを愛媛大学農学部の研究温室に設置し、早期の実用化を目指した研究を共同で実施中である。

高糖度トマト栽培では、トマトの茎や葉のしおれ具合を常に観察し、水やりのタイミングを判断する必要があるため、従来の日射比例灌水技術等による水やりの自動化が困難とされていたが、画像処理技術によりトマトの茎や葉のしおれ具合をリアルタイムに数値化できれば、この水やりを自動化できる可能性がある。

今回は、ハッピー・マインダーに搭載した植物生体情報計測用画像処理技術の概要、及びトマト葉のしおれ具合の数値化を行うための画像処理ソフトウェアの概要について報告する。

2. 組み込み型画像処理技術の概要

本報告の画像処理技術に用いたシステムは、ハッピー・マインダーのデータ収集ユニットとカメ

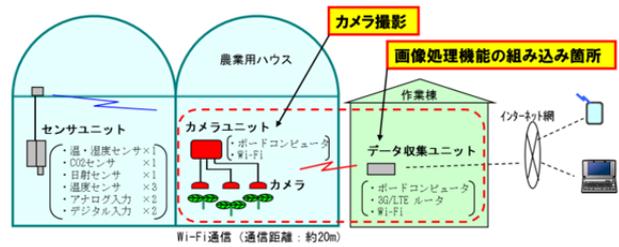


図1 栽培環境モニタリングシステム「ハッピー・マインダー」の全体構成



図2 データ収集ユニット



- センサ画素数：120万画素
- フォーカス：40cm~∞(固定フォーカス)
- 外形：縦125mm×横175mm×奥75mm
- 電源：AC100V

図3 カメラユニット

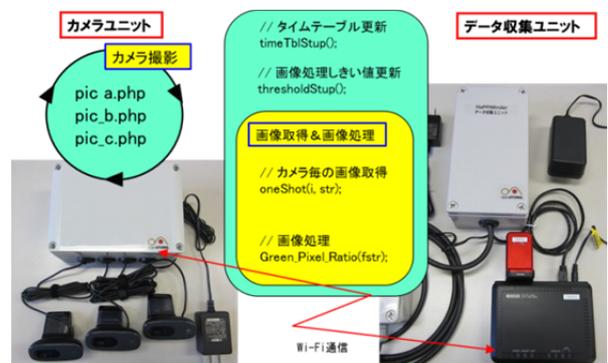


図4 カメラ画像取得および画像処理のイメージ

ラユニットから構成される（図 2, 3）。

あらかじめ設定した時間周期または時刻となった時に、カメラユニットでカメラ撮影及び画像取得・更新を行い、Wi-Fi 通信によりデータ収集ユニットへ画像を転送し保存している。このとき、同時に画像処理を実行する（図 4）。

データ収集ユニットへの画像処理機能の組み込みには、シングルボードコンピュータに OpenCV（Open Source Computer Vision Library：インテル(Intel)社が開発・公開したオープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリ）²⁾ を搭載し、画像処理プログラムを Java 言語³⁾ で開発することで実施した。

3. 画像処理プログラムの概要

先述のように、本画像処理プログラムの目的は、水やりの指標としてトマト葉のしおれ具合を把握することにある。

そこで、トマトを上方から撮影し、画像全体に占める植物体の割合を画像処理によって数値化した。これは、トマトの葉が萎れると画像全体に占める植物体の割合が減少することに着目したものである。

この数値をデータ収集ユニットで継続して収集し、その変化を把握することで、植物体のしおれの具合を判断しようと考えている。

画像処理プログラムの概要は次の通りである。

① 色成分の分離：

元画像の色空間を RGB モデルから HSV モデル（色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) の三つの成分からなる色空間）に変換し、各成分に分離する（図 5）。^{4) 5)}

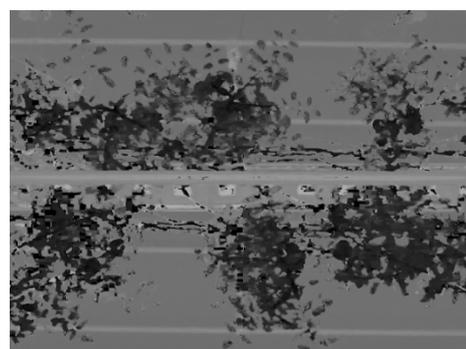
元画像の背景にブルーシートを敷き詰めているが、これは色相について青色成分と緑色成分の分離を容易にするためである。（図 7）

② 2 値化：

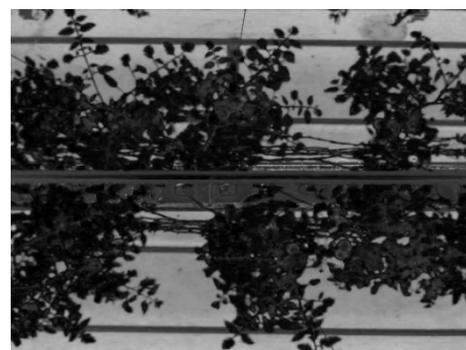
トマト葉が抽出できるように、色相 (H)、彩度 (S)、明度 (V) それぞれについて閾値を設定し、抽出条件範囲内の画素を白色、それ以外の画素を黒色とする 2 値化⁴⁾を行った（図 6(a), (b), (c)）。



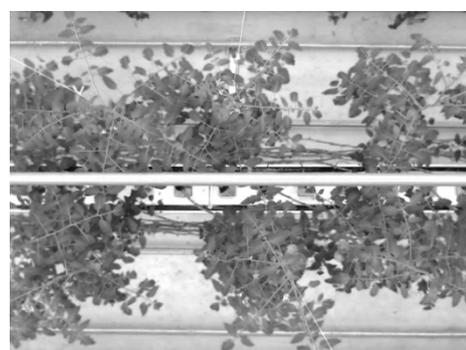
(a) 元画像



(b) 色相 (H) 成分



(c) 彩度 (S) 成分



(d) 明度 (V) 成分

図 5 元画像を HSV モデルに分離

その後、3条件の and 条件を求め最終的な2値化画像とした(図8(b))。

なお、色相の高い側の閾値は、「大津の手法」⁶⁾を用いて自動的に閾値を決定している。

③ しおれ具合の数値化:

最終的な2値化画像から全画素数に占める白色画素数の割合を数値化しトマト葉の割合(=しおれ具合)を求めた(図8(c))。

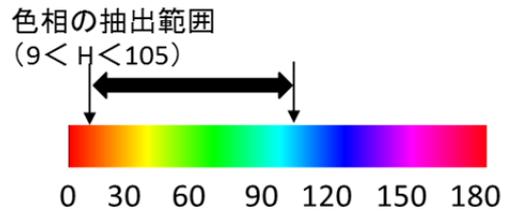
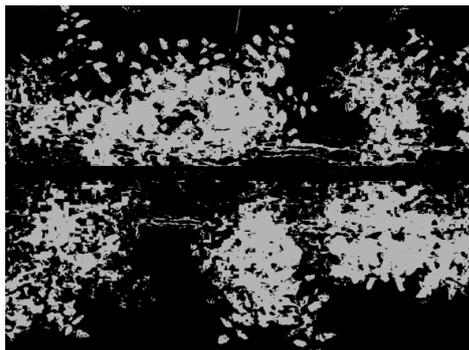
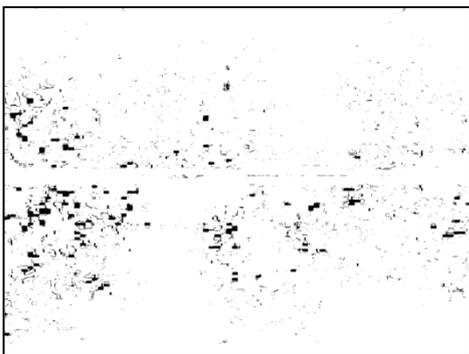


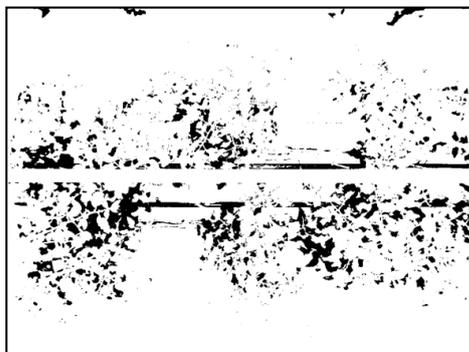
図7 OpenCVでの色相(H)と抽出範囲



(a) 色相(H)に関する2値化画像
(抽出範囲: $9 < H < 105$)



(b) 彩度(S)に関する2値化画像
(抽出範囲: $S > 2$)

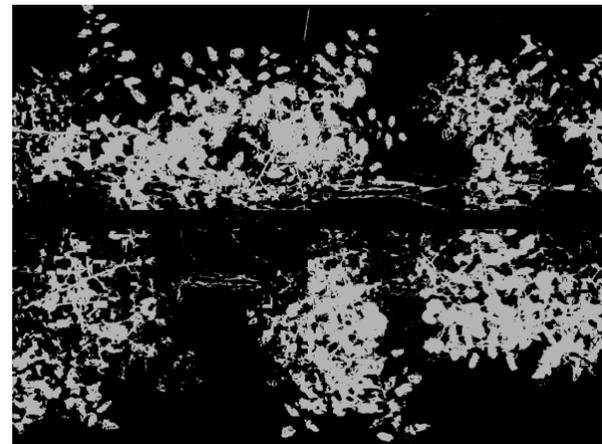


(c) 明度(V)に関する2値化画像
(抽出範囲: $V > 91$)

図6 各成分の2値化結果



(a) 元画像



(b) 画像処理結果

総画素数	: 12,288,000 画素
白画素数	: 320,530 画素
トマト葉の割合	: 26.08 %

(c) トマト葉の割合

図8 画像処理結果とトマト葉の割合

4. 画像処理結果の評価

水やりの前後で、画像処理によるしおれ具合の検証を行った。

画像処理の結果、トマト葉のしおれ具合を数値化したものは、水やり前 18.42%と水やり後 20.12%で、やはり水やり前の方が萎れており、しおれ具合を数値として反映できることを確かめた (図 9, 10)。

5. まとめ

今回、ハッピー・マインダーを利用した組み込み型の画像処理技術を開発し、トマト葉のしおれ具合を数値化し、植物の生体情報計測データとして取得することが出来た。現在、本画像処理技術を組み込んだハッピー・マインダーを用い、愛媛大学農学部知的植物工場内のトマト栽培施設にて現地試験を継続中である。

このような植物生体情報計測データを継続して収集できる仕組みを構築すれば、お客様が植物体の生育状況を数値データとして直感的に把握することが可能になり、さらに利便性が向上すると考える。

[参考文献]

- 1) 高山弘太郎、仁科弘重、山本展寛、羽藤堅治、有馬誠一 : 「デジタルカメラを用いた投影面積モニタリングによるトマトの水ストレス早期診断」, 植物環境工学 Vol. 21 (2009) No. 2 , p59-64
- 2) 北山洋幸 (2013): 「Java で始める OpenCV プログラミング」, ㈱カットシステム
- 3) 掌田津耶乃 (2013): 「Eclipse4.3 ではじめる Java プログラミング入門 Eclipse4.3 kepler 対応」, ㈱秀和システム
- 4) 羽藤堅治、松浦英樹、橋本康 : 「画像認識に基づいた収穫をサポートするデータベースの開発 HS I 法による各成熟段階の識別」, 植物工場学会誌 Vol. 10 (1998) No. 3 , p145-150
- 5) 松浦英樹、羽藤堅治、山下淳、橋本康 : 「センサフュージョンに基づくロボット視覚センサによる認識-距離データと二次元画像データの融合-」, 植物工場学会誌 Vol. 9 (1997) No. 2 , p132-138

- 6) 大津展之: 「判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法」, 電子通信学会論文 D, Vol. 63 (1980), No. 4, p349-356

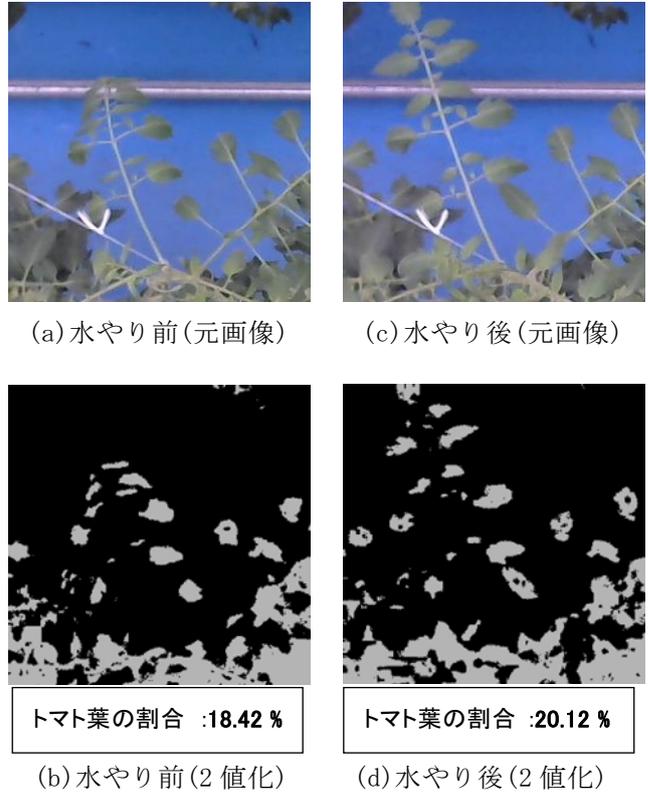


図 9 水やり前後のトマト葉のしおれ具合の数値化

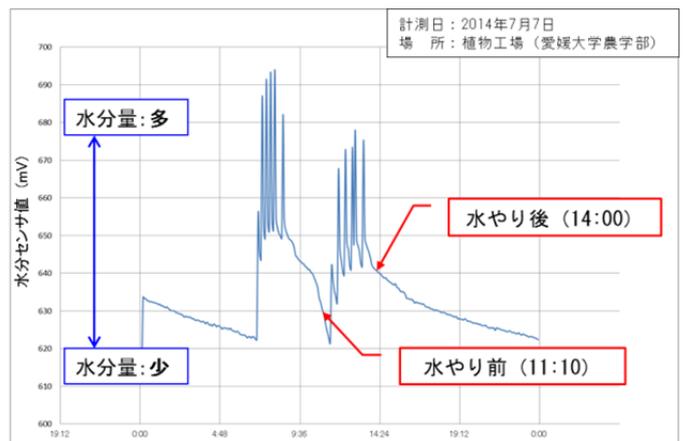


図 10 トマト培地内の水分センサ値の比較 (水やり前・後)

学位取得のお知らせ

四国総合研究所では新たに2名が学位を取得されましたのでお知らせいたします。

学位取得者：河野高一郎

論文：「長距離配電線に対応した太陽光発電系統連系用
電力変換装置の無効電力制御手法に関する研究」

論文提出先：徳島大学

取得学位：博士（工学）

取得日：平成27年9月10日

取得者略歴：

平成5年3月 神戸大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了

同年4月 四国電力㈱入社

配電設備の計画、運用に関する業務に従事

平成23年3月 ㈱四国総合研究所に出向 電力技術部に配属

分散型電源の系統連系に関する研究に従事

平成27年9月 徳島大学大学院先端技術科学教育部博士後期課程システム創生工学
専攻修了

現在、電力技術部 副主席研究員



学位取得者：高附 亜矢子

論文：「収穫後の短時間近赤外光照射による農作物の蒸散抑制・品質保持に関する研究」

論文提出先：岡山大学

取得学位：博士（農学）

取得日：平成27年9月30日

取得者略歴：

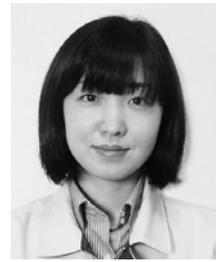
平成14年3月 香川大学大学院農学研究科修士課程生物資源科学科専攻修了

平成19年4月 ㈱四国総合研究所入社 バイオ研究部に配属

遺伝子解析を利用した魚卵識別技術の開発、石炭灰の有効利用に関する研究、発電所におけるバイオレメディエーション適用性評価に関する研究などに従事

平成25年4月 化学バイオ技術部に配属

平成27年9月 岡山大学大学院環境生命科学研究科博士後期課程農生命科学専攻修了
現在、化学バイオ技術部 研究員



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103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