

集中連系型太陽光発電システムにおける 変動特性評価法に関する研究

Study on Evaluation Method of the Fluctuation Characteristics of
Clustered Grid-connected Photovoltaic Systems

川崎 憲広 *1
Norihiro KAWASAKI
西川省吾 *4
Shogo NISHIKAWA

北村 清之 *2
Kiyoyuki KITAMURA
長坂 研 *5
Ken NAGASAKA

杉原 裕征 *3
Hiroyuki SUGIHARA
黒川 浩助 *6
Kosuke KUROKAWA

Abstract

An output of PV systems has a short-term fluctuation due to weather fluctuation. It may give undesirable effects on an individual power system, and it makes the capacity value (kW value) of the PV system lower. For resolution of those problems, authors have studied "the smoothing effect" which is smoothed total irradiance in the area. Fluctuation of output of a few PV systems is sensitive, but fluctuation of total output in clustering PV systems is not remarkable because there is the smoothing effect of irradiance in certain area. According to the smoothing effect, the capacity value of PV systems is increased, and problems for utility occurred by fluctuation of PV output power can be alleviated. Therefore, it is very important to quantify this effect and to develop the evaluation method. In this study, the evaluation method of smoothing effect of PV systems is proposed by frequency analysis: i.e. Wavelet transform. Frequency analysis is useful to identify fluctuation values of each time scales. The processing speed of this method is fast, suitable for evaluation of a lot of data. Irradiance and PV output data 553 PV systems clustered will be measured every second as the part of NEDO's project, "Demonstrative Research on clustered PV Systems" from March, 2004, to March 2008 in Ota, Gunma. In this paper, the authors analyzed fluctuation characteristics of clustered PV system by using this evaluation method. From analysis results, it was clarified that fluctuation of this site tends to decrease in two minutes and below at fluctuation time as number of PV systems increased.

キーワード：集中連系型 PV システム，変動解析，ならし効果

Key Words : Clustered Gird-connected PV System, Fluctuation Analysis, Smoothing Effect

1. はじめに

世界のエネルギー需要が年々増加しており^①、それに伴う地球環境への影響は国際的に議論されている。様々な対策等が提案されているが、再生可能エネルギーに対する期待も大きい。そのため、世界各国で導入目標が設定され、

それに向かた導入政策や技術開発が進んでいる。太陽光発電（PV）に関しては、わが国では2010年までに累積設置容量4.82 [GW]の目標が掲げられており、2006年までに約1.71 [GW]^② が導入された。これに対し、ドイツでは約2.86 [GW]^③ が導入されており、これらのほとんどが系統連系型PVシステムである。従って、今後も電力系統に連系するPVシステムが増加することが予想される。

その一方で、PVシステムの発電電力は天候によって大きく変動することもあるので、電力系統からみれば電圧変動や周波数変動などの電力品質の低下や発電設備としての価値（kW価値）の低下が懸念されている。そのため、複数台のシステムが集中的に導入されることでそれらの影響

*1 東京農工大学 工学府 大学院生（〒184-0012 東京都小金井市 中町2-24-16）e-mail: norihiro@cc.tuat.ac.jp

*2 株明電舎

*3 株関電工

*4 日本大学 理工学部 電気工学科 准教授

*5 東京農工大学 工学府 准教授

*6 東京工業大学 統合研究院 特任教授

（原稿受付：2008年11月11日）

がどの程度拡大していくのか正確に把握することは、今後の導入量増加、ならびに変動対策のためには非常に重要なことである。

複数のPVシステムの出力変動に関しては「ならし効果」と呼ばれる変動平滑化効果が知られており、これまでいくつかの研究³⁾⁻⁶⁾が行われてきた。ならし効果とは、ある地域内に複数台のPVシステムが集中連系すると、設置面積が広がり、Fig.1に示すように雲の移動による出力変動は各地点で時間的なずれが生じ、全体の出力変動が相対的に小さくなる現象である。よって、発電電力の変動が電力系統に与える影響やkW価値等を正確に議論する際、この現象の考慮は不可欠であり、これを考慮しない場合、過剰な変動対策を見積もってしまう危険性がある。

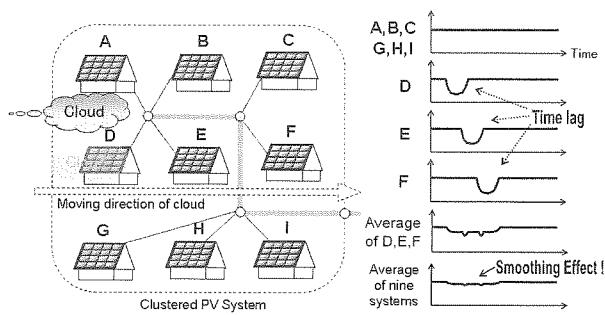


Fig.1 Conceptual diagram of the Smoothing Effect

図1 ならし効果の概念図

これまでの研究では、数箇所の日射変動を用いて標準偏差³⁾⁴⁾やLFC容量⁵⁾で評価が行われたり、さらに広域のデータを用いて出力変動幅の推定法⁶⁾が検討されたりしており、これらの成果からならし効果の有効性が示されてきた。しかしながら、実際にPVシステムが大量導入された際の分析例は少ない。メガソーラーシステムでは、産業技術総合研究所での実証結果⁷⁾が報告されているのみであり、住宅においては、高密度連系時のインバータによるPV出力変動の平滑化機能の実証⁸⁾等は行われていたが、面的な拡張によるならし効果は検証されていない。

そこで、本研究では2002年12月より群馬県太田市で行われている（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO技術開発機構）の受託研究「集中連系型太陽光発電システム実証研究」⁹⁾の一環として、553軒のPVシステムの変動の分析ならびにならし効果の実証を行った。また、この実証研究では全軒を1秒周期で計測しており、大量のデータを解析するため、高速に処理できる変動特性の評価手法の開発が求められていた。そこで本稿では、新たに開発した変動特性の評価手法を紹介し、集中連系型PVシステムの変動特性およびならし効果の実態の分析結果を報告する。

2. 変動特性の評価手法

変動には、速さ・大きさ・頻度という特徴が混在しているので、変動特性を評価するにはこれらを抽出する必要がある。また、ならし効果が「変動の頻度の低減」と「変動の大きさの低減」という特徴を有していることからもこれらを評価することが重要になる。また、前述のように500軒以上のシステムを1秒毎に計測していることから、解析対象となるデータは非常に膨大になり、変動の特徴抽出の処理は高速に行えることが求められる。そこで高速処理を実現するためにフーリエ変換とウェーブレット変換の2つの周波数解析を用いた。ここで、フーリエ変換では変動の周波数分布から変動の頻度と大きさを考慮した特性を把握するために変動エネルギー（EF: Energy of Fluctuation）という指標を定義した。一方、ウェーブレット変換では時系列の周波数解析（時間-周波数解析）という特長を生かし、周波数帯毎の時間的な特徴点を抽出して、最大の変動の大きさ（幅）を把握するために最大変動幅（MMF: Maximum Magnitude of Fluctuation）という指標を定義した。また、解析対象とする変動周期の範囲は、速い変動から遅い変動まで満遍なく分析できるようにオクターブ分割という分割方法を採用した。開発した評価手法のフローチャートはFig.2のとおりである。

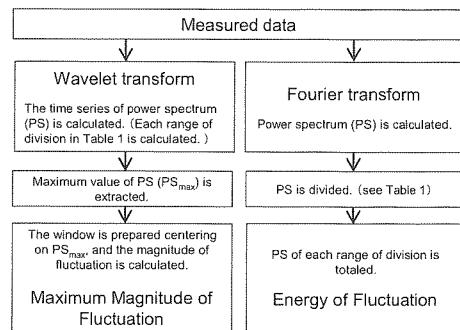


Fig.2 Evaluation flow chart

図2 評価手法のフローチャート

2.1 解析対象範囲の分割方法

時系列データを周波数領域に変換した後、ある範囲毎に分割することで評価が行いやすくなる。そこで、Table.1に示すように全ての周波数領域において満遍なく解析が可能なオクターブ分割を採用了。

オクターブ分割とは、線形軸上では帯域を2分割し、その後も低周波領域のみを引き続き2分割していく分割法で、対数軸上でみると等分割になる。本研究では1秒周期で計測しているデータを用いているので、サンプリング定理より最大で0.5[Hz]、変動周期に換算すると2秒の変動まで解析可能である。これをもとにオクターブ分割により決まる各分割の変動周期の範囲はTable.1に示すとおりである。ここで、代表値としてグラフにプロットする際に用いる値、および算出されるパワースペクトル PS_W の数も示した。

Table 1 Range of fluctuation cycle

表1 変動周期の範囲

Division Number (Level) <i>j</i>	Range of fluctuation cycle			Number of data of SP_W
	Lower bound	Upper bound	Representative value [second]	
1	2"	4"	2	32768
2	4"	8"	4	16384
3	8"	16"	8	8192
4	16"	32"	16	4096
5	32"	1' 04"	32	2048
6	1' 04"	2' 08"	64	1024
7	2' 08"	4' 16"	128	512
8	4' 16"	8' 32"	256	256
9	8' 32"	17' 04"	512	128
10	17' 04"	34' 08"	1024	64
11	34' 08"	1° 08' 16"	2048	32
12	1° 08' 16"	2° 16' 32"	4096	16
13	2° 16' 32"	4° 33' 04"	8192	8
14	4° 33' 04"	9° 06' 08"	16384	4
15	9° 06' 08"	18° 12' 16"	32768	2

* ° : hour, ' : minute, " : second

2.2 変動の幅に関する特性

(1) 最大変動幅 変動評価において最大でどの程度の大きさの変動が起きるのかを把握することは、電力の需給バランスの観点からも重要になってくる。そこで、前述の分割範囲毎に変動幅の最大値を最大変動幅と定義した。

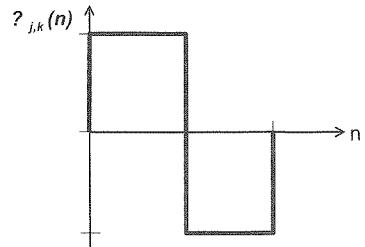
最大変動幅の算出には、ウェーブレット変換を用いているので、ここではまず、ウェーブレット変換について述べる。ウェーブレット変換とは、時間-周波数解析といって周波数特性を時系列で分析できる手法であり、周波数帯毎の特徴点抽出等に向いている。その基本となるウェーブレット係数は、式(1)で示すように解析対象とするデータ $x(n)$ とウェーブレット関数 $\phi_{j,k}$ の畳み込みによって計算される。つまり、言い換えれば $\phi_{j,k}$ に類似した変動を抽出することができる。

$$W(j,k) = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{\phi_{j,k}(n)} x(n) \quad \cdots(1)$$

但し、 $\phi_{j,k}(n)$ ：ウェーブレット関数、 $x(n)$ ：時系列データ、 N ：全データ数、 n ：時間（データの位置）、 k ：時間（ウェーブレット関数を移動させる時間軸）、 j ：周波数帯（ウェーブレットの時間幅）

離散ウェーブレット変換の $\phi_{j,k}$ は一般的に式(2)で表され、本研究では日射の短周期変動の形に類似した矩形波状の Haar ウェーブレット (Fig.3) を採用している。これは最も単純なウェーブレット関数であり、計算時間が短縮できるという特徴もある。

$$\phi_{j,k}(n) = \sqrt{2^{-j}} \phi(2^{-j}n - k) \quad \cdots(2)$$

Fig.3 Haar ウェーブレット関数 $\phi_{j,k}(n)$ 図3 Haar ウェーブレット関数 $\phi_{j,k}(n)$

そして、ウェーブレット係数を 2乗することでパワースペクトル PS_W を式(3)から求めることができる。

$$PS_W(j,k) = |W(j,k)|^2 \quad \cdots(3)$$

最大変動幅の算出は周波数帯毎に行い、 PS_W の上位何点かを用いる。周波数帯、言い換えれば、変動周期範囲は Table.1 に示すように 2 の累乗毎に分割されており、あらゆる周波数帯を満遍なく解析できる。ここで、ある点の時刻 m とし、そこを中心に評価窓を分割範囲 ($\pm 2^i$) で設定する。そして評価窓内の最大値と最小値の差を式(4)から最大変動幅 MMF_j の候補として算出し、いくつかの点から求まる候補の中の最大値を最大変動幅として採用する。

$$MMF_j = \max[x_m(n)] - \min[x_m(n)] \quad \cdots(4)$$

但し、 $x_m(n)$ ：評価窓内の時系列データ

Fig.4 には、最大変動幅の検出イメージを示している。

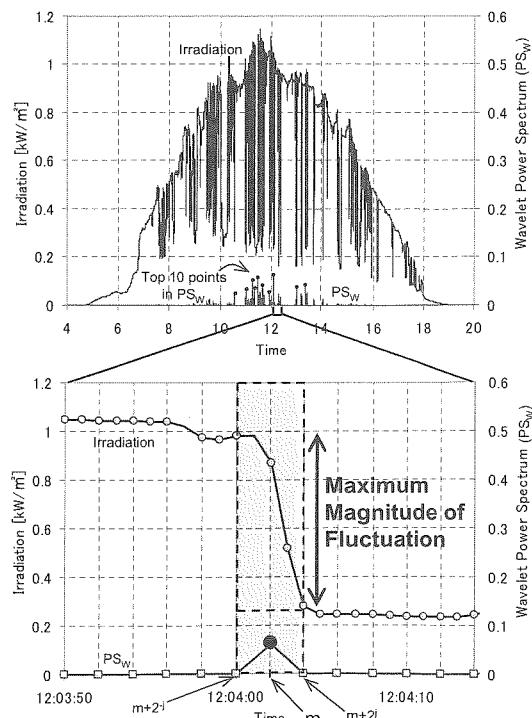


Fig.4 Detection of MMF

図4 最大変動幅の検出例

(2) 最大変動幅と最大出力変動幅 最大変動幅は、最大出力変動幅 (LOF : Largest Output Fluctuation)⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾に一致することが理想である。最大出力変動幅は次のように定義されている⁷⁾。Fig.5 のような出力変動の時系列がある場合、ある長さの時間を定めて時系列中に評価窓を設定する。この評価窓内に出現する出力の最大値と最小値の差がその評価窓の位置における出力変動幅という。評価窓の位置を時系列の先頭から末尾まで順にずらしたときに現れる出力変動幅の最大値がその評価窓における最大出力変動幅と呼ばれている。この指標も電力系統が需給バランスの維持に必要な調整力を評価するために考案されている。評価窓の大きさは変動周期に相当し、窓の大きさを変えることであらゆる周期の変動を検出することができる特徴で、これに対して最大変動幅では離散ウェーブレット変換を用いているため、Table.1 で示した評価窓のみの評価となる。これに関しては、前述のようにあらゆる周波数帯を満遍なく評価できることから十分であると考えている。

また、計算方法に関しては、最も単純に計算する場合、つまり、任意の窓を計測間隔毎にずらしながら算出していく場合、1 秒値等のようにサンプリングが細かく、データ量が多くなると計算時間が非常に長くなってしまう。言い換えれば、時間をかけて確実に評価窓内の最大の変動を抽出できる。これに対し、最大変動幅はウェーブレットパワースペクトル PS_W で予め最大変動幅を抽出する時刻の候補をあげ、そこから最大のものを抽出するので、計算回数は大幅に短縮することができる。しかしながら、 PS_W の採用点数によっては Fig.6 に示すように大きな誤差になってしまい。この例では、中長期成分の誤差が大きくなっているが、これは Table.1 にあるように、これらの領域においては PS_W のデータ数が極端に少なくなっているために変動を正確に抽出することが難しくなっている。また、これらの領域において Haar ウェーブレットとの類似度が低下していることも原因にあげられる。そのため、 PS_W の採用点数を決めるることは非常に重要であり、これを増やすことで精度向上が期待できる。しかしながら、ここで計算時間にも注意しなければ本手法の利点を生かすことはできない。

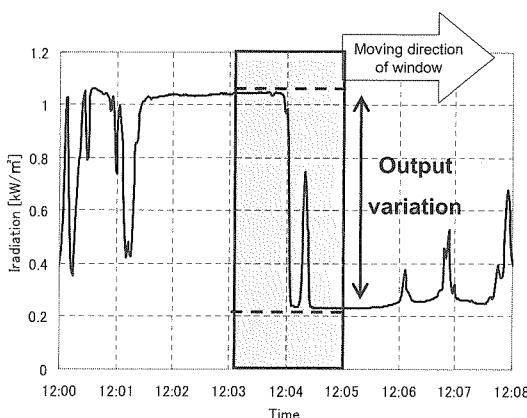
Fig.5 Largest Output Fluctuation⁶⁾

図 5 最大出力変動幅

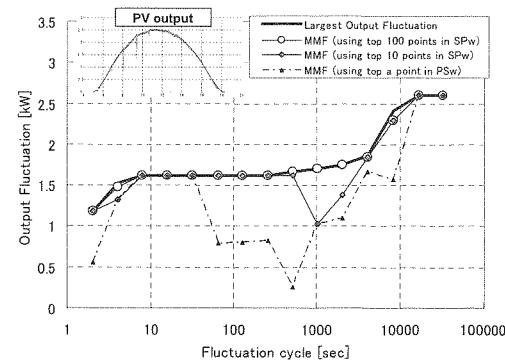


Fig.6 Example of output fluctuation of PV system (2007/5/20)

図 6 PV システムの出力変動の例 (2007/5/20)

(3) 最大変動幅の解析精度と計算速度 検討に用いたデータは、群馬県太田市で 2007 年 5 月 (1 ヶ月分) に計測された、ある 1 軒の PV アレイの電力である。また、解析精度の検証のため、式(5)で定義する相対誤差を用いた。

$$\text{relative error} = \frac{\text{LOF} - \text{MMF}}{\text{PV array capacity}} \times 100 \ [\%] \quad \cdots(5)$$

式(5)の通り最大出力変動幅 LOF を真値としており、最大変動幅 MMF は原理的に LOF を超えることがないので、相対誤差は常に正の値になる。

相対誤差の算出は、1 日毎、変動周期毎に行い、1 ヶ月間の最大値と平均値を変動周期毎に求めた。また、 PS_W の採用点数毎に同様の検証を行い、Fig.7 に 1 ヶ月間の相対誤差の最大値を示す。この図は縦軸が PS_W の採用点数、横軸が変動周期、そしてグラフの面が相対誤差を示している。またここで、LOF 並びに MMF は最大変動を評価する指標であることから、相対誤差の最大値を知ることは最も重要である。この結果より、 PS_W の採用点数が上位 100 点のときに相対誤差の最大値がほとんどの領域で 10[%]以下になっている。上位 1000 点以上は相対誤差の値に変化はなかった。Fig.8 には、相対誤差の 1 ヶ月間の平均値を示す。

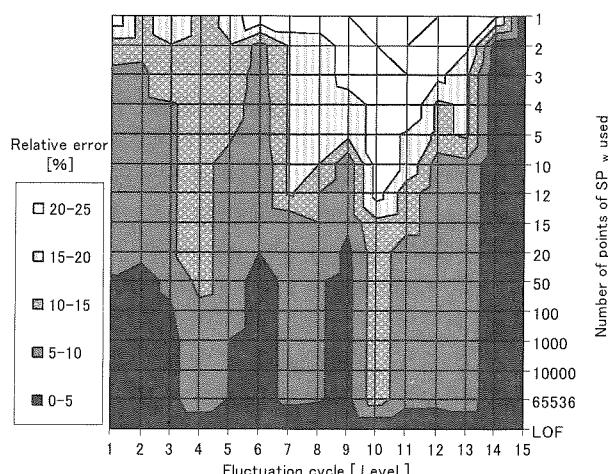


Fig.7 Maximum value of relative error for each fluctuation cycle

図 7 最大変動幅の算出における相対誤差の最大値

この結果から、平均的には MMF の相対誤差は小さく、 PS_W の採用点数が上位 100 点のときには全ての変動周期で相対誤差が 4[%]以下になっていることがわかる。これらの結果から、解析精度という観点では、 PS_W の採用点数が上位 100 点以上に設定することで LOF とほぼ同等な値を計算できるといえる。

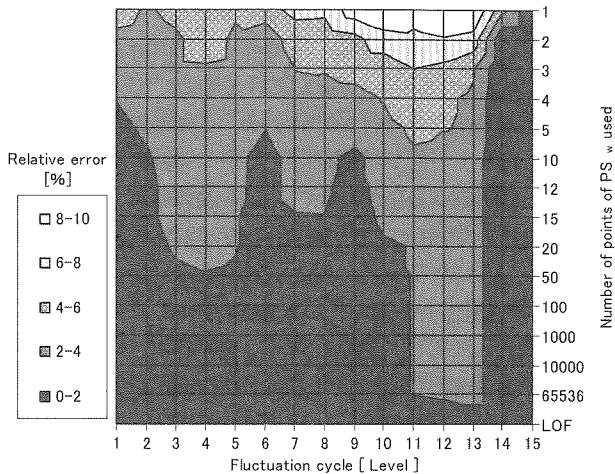


Fig.8 Mean value of relative error for each fluctuation cycle

図 8 最大変動幅の算出における相対誤差の平均値

計算速度の検証には、CPU : Intel Core2 2.4GHz, メモリ 2GB のパソコン 컴퓨터、さらにプログラム言語は MATLAB (R2006a) を用いた。また、計算時間の計測には MATLAB の計算時間を計測するコマンド「tic」と「toc」を用いて行った。計算速度は LOF の計算速度を基準として単位は「倍」で表した。計算速度は PS_W の採用点数毎に算出し、Fig.9 に示す。この結果より上位 1000 点を採用した場合は、LOF の 1805 倍の計算速度で解析できることがわかる。もう少し誤差を許容するのであれば、採用点数を減らし、計算速度を上げることが可能である。このように本研究で開発した評価手法は、膨大なデータを処理する上で重要となる計算速度を改善できたといえる。

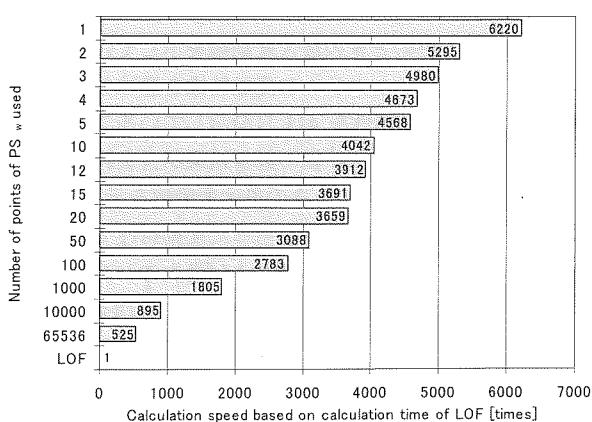


Fig.9 Calculation speed based on calculation time of LOF

図 9 LOF の計算時間を基準としたときの計算速度

2.3 変動の頻度に関する特性

(1) 変動エネルギー 最大変動幅ではいわゆる変動の最悪のケースを周期毎に抽出したといえるが、変動の分布は考慮できていない。変動評価において、1 日全体としてどのような変動が分布しているかを把握することも重要である。変動の分布を捉えるには、時間領域の時系列データを周波数領域に変換するフーリエ変換が有効である。そこで、前述の分割範囲毎に時系列データが持つ「信号としてのエネルギー」を「変動が発生するためのエネルギー」と考え、変動エネルギーと定義した。

変動エネルギーの意味は、式(6)で示されるパーシバルの定理から考えると理解しやすい。この式で左辺は時系列データの時間領域における全エネルギー（時系列データの 2 乗の総和）、右辺は周波数領域における全エネルギー（パワースペクトルの総和）を示している。変動エネルギーは、周波数領域における全エネルギーを前述の分割範囲毎に分割したものである。

$$\sum_{n=1}^N |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N PS_F(k) \quad \cdots(6)$$

但し、 $x(n)$: 時系列データ、 N : 全データ数、 k : 周波数、
 n : 時間、 $PS_F(k)$: パワースペクトル

周波数領域の全エネルギーには直流分も含まれるが、この評価手法では評価の対象にしていない。また、変動エネルギーを算出する過程を以下に示す。

まず、フーリエ変換によりフーリエ係数 $X(k)$ を式(7)から求め、その絶対値の 2 乗からパワースペクトル PS_F を算出する（式(8)）。 PS_F は各周波数におけるエネルギーを示している。そのため、Table.1 に示す周波数帯毎に合計することで各変動周期の変動エネルギー EF_j が算出できる（式(9)）。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad \cdots(7)$$

$$PS_F(k) = |X(k)|^2 \quad \cdots(8)$$

$$EF_j = \sum_{k=k_1}^{k_2} PS_F(k) \quad \cdots(9)$$

但し、 j : 分割箇所（周波数帯）、 k_1 : ある分割範囲の開始番号、 k_2 : ある分割範囲の終了番号。

(2) 計算時間 最大変動幅で行った検証と同様の条件で変動エネルギーを算出するためにかかる時間を計測した。その結果、1 データあたりの計算時間は約 0.021 秒であり、最大変動幅の算出より短いことがわかった。以上のことから、本研究で開発した評価手法は処理時間が短く、膨大なデータの解析に向いていることが確認できた。

3. 解析対象データ

本実証試験地区では、2006年4月頃にPVシステムの連系軒数が553軒に達し、2008年2月19日まで計測が行われた。この期間で各種試験等の要因でデータが欠落したものは、本研究のような秒オーダーの変動評価に用いることは適さないと判断して除外し、それ以外の有効なデータ(有効端末数)が1日に500軒以上ある日を解析対象日とした。以上のことを踏まえた解析の条件は以下のとおりである。

- ・解析期間：2006/4/17～2008/2/19
(有効端末が500軒以上の日：413日)
- ・計測周期：1秒
- ・計測項目：PVアレイ電力
- ・解析端末数：500軒
- ・解析パターン：実証試験地区の中心のPVシステムから
近い順に増加（同心円状、Fig.10参照）

ここで、解析端末数の上限を決めた理由は、解析期間のデータ数を揃え、比較するためである。また、PVシステムが増加すると設置面積も拡大することから、解析パターンはFig.10に示すように中心のPVシステムから近い順に増加させて解析した。このときのPVシステム数と面積およびPVアレイ容量の関係はFig.11に示している。PVアレイの容量は、1軒平均で約3.84[kW]、500軒のときの容量は1.922[MW]である。また、実証試験地区におけるPVシステムは均等に設置されているわけではないので、PVシステム数と面積の関係が不連続になる箇所が存在する。ここでいう面積とは、PVシステム1軒を1つの点とみなし、ある複数のPVシステムの集合に対して、凹みのない多角形（凸多角形）を形成したときの面積を意味する。従って、後述する解析結果にPVシステム数との関係を示す場合でも面積の情報も含まれていることに注意していただきたい。また、PVシステム数と面積を含む指標を導入規模と呼び、その単位はPVシステム数の[軒]を用いる。

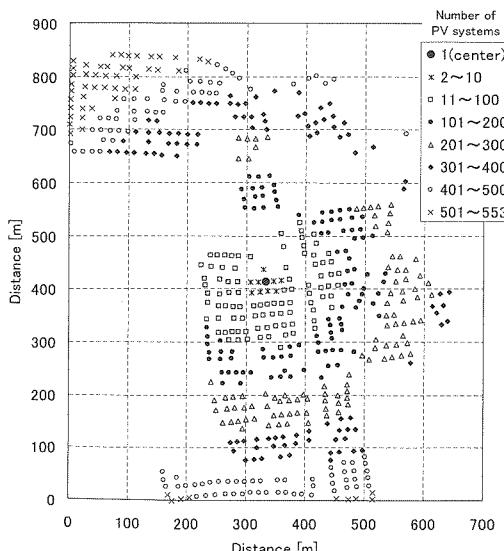


Fig.10 Analysis patterns of PV system

図10 PVシステムの解析パターン

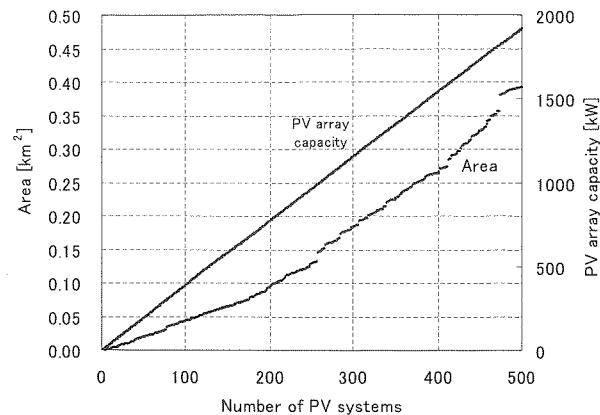


Fig.11 Relationship to number of PV systems, area and PV array capacity

図11 PVシステム数と面積、PVアレイ容量の関係

4. 集中連系型PVシステムの変動特性

4.1 最大変動幅

前述の評価手法および解析条件の下、集中連系型PVシステムの変動特性を解析した。ここで最大変動幅の算出には、計算時間と解析精度の観点から PS_W の採用点数を上位1000点と設定した。解析結果は、箱ひげ図と呼ばれるデータの分布を表現するグラフで示す。

ここで用いる箱ひげ図は、箱の中にある線を中心値とし、箱の下端は全データ数の25%値、箱の上端は全データ数の75%値に相当している。このように1/4ずつとった値は四分位値と呼ばれ、小さいほうから第1四分位値 Q_1 (25%値)、第2四分位値 Q_2 (中央値)、第3四分位値 Q_3 (75%値)となる。ひげとなる線の長さは、四分位範囲QR(Quartile Range: $QR=Q_3-Q_1$)で定義され、ひげの範囲をQRの1.5倍以内として扱うことで分布のゆがみや外れ値を判別やすくしている。従って、ひげの下端は $Q_1-1.5QR$ で求まる値、ひげの上端は $Q_3+1.5QR$ で求まる値となっている。この範囲を逸脱した値は外れ値として基本的には点で示しているが、評価対象のデータ数が多いことから点が重なり、太い線のようになっていることもあるので注意していただきたい。

Fig.12には1軒のときの最大変動幅を示している。つまり、点としてのPVシステムの変動特性を意味しており、500軒分の点の変動特性を413日分示していることから一つの箱ひげ図には206,500個の解析結果が含まれている。一方、Fig.13には500軒のときの最大変動幅を示している。これは点に対して面的拡がりをもった変動特性であり、今回の解析条件の中で最大の面積および最大のシステム数である。この場合は1日に一つの結果が出力されることから一つの箱ひげ図には413個の解析結果が含まれている。また、これらの結果における最大変動幅はPVアレイの定格容量で規格化しているため、PVシステムの導入規模（軒数、面積）が異なっても相対的な比較が可能である。

そこでまず、これらの結果の最大値（ひげ、もしくは外

れ値の上端)において特に顕著な差がある変動周期 2 秒, および 64 秒に関して比較する。ここで、前述のように変動周期は Table.1 に示す代表値でグラフにプロットしているが、実際には例えば変動周期 2 秒なら「2 秒~4 秒」と範囲があることに注意していただきたい。以上のことと踏まえ、変動周期が 2 秒のときを比較すると、導入規模 1 軒の場合、最大変動幅の最大値は 81.98[%]、導入規模 500 軒の場合は 20.71[%]となり、相対的に設備容量の 61.27[%] の最大変動幅が低減されたことがわかる。これを実際の出力変動に換算すると、1.178[MW] ($1.922[\text{MW}] \times 61.27[\%]$) となり、ならし効果を考慮することで非常に大きな変動を低減できることが確認できた。一方、変動周期 64 秒のときは、導入規模 1 軒では 88.99[%]、導入規模 500 軒では 74.25[%] となり、最大変動幅の低減は 14.74[%] であった。変動周期 2 秒のときに比べるとならし効果は小さくなっているが、実際の出力変動に換算すると 288[kW] ($1.922[\text{MW}] \times 14.74[\%]$) も低減している。これ以降の変動周期が長い領域でも最大変動幅の低減が約 12~19[%] 程度あり、これはこれらの変動周期の成分に乗った短周期変動成分が小さくなつたためだと考えられ、最も長い変動周期に関しては発電電力のピークがカットされる効果であるといえる。

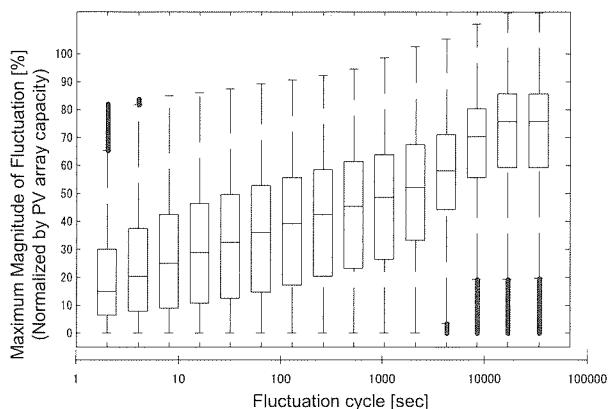


Fig.12 MMF of a PV system each fluctuation cycle

図 12 導入規模 1 軒のときの最大変動幅

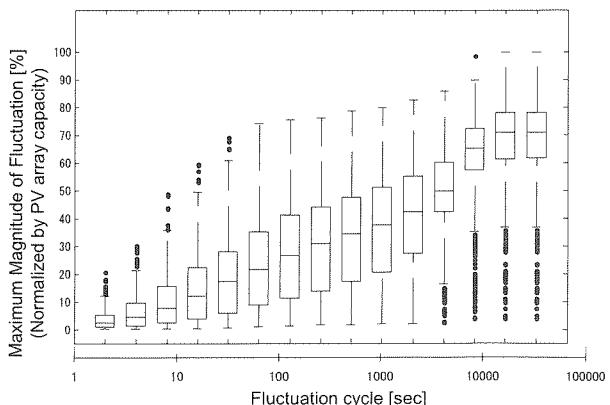


Fig.13 MMF of 500 PV systems each fluctuation cycle

図 13 導入規模 500 軒のときの最大変動幅

次に、最大変動幅の中央値に関して導入規模 1 軒と 500 軒を比較する。変動周期 2 秒において導入規模 1 軒の場合は 15.10[%]、導入規模 500 軒の場合は 2.44[%] となり、導入規模の拡大によって非常に小さな変動になることがわかる。また最大変動幅の低減は 12.66[%] であった。一方、変動周期 64 秒では、導入規模 1 軒の場合に 36.26[%]、導入規模 500 軒の場合は 21.66[%] となり、最大変動幅の低減は 14.60[%] であった。また、最大変動幅の低減が最も大きい変動周期は 8 秒のときで、17.20[%] (1 軒 : 25.05[%], 500 軒 : 7.85[%]) であった。さらに、変動周期が長くなるに従って最大変動幅の低減効果は小さくなり、最長の変動周期では最大変動幅の低減が 4.73[%] (1 軒 : 75.73[%], 500 軒 : 70.90[%]) となった。これは長周期の変動において中央値ではほとんどならし効果の影響が無いことを意味している。つまり、解析結果の中央値となる日の変動は最大値のときのように突発的な変動を含まない変動特性であり、発電電力のピークをカットするような効果はほとんどない。

ここまででは導入規模 1 軒と 500 軒の比較であったが、次に導入規模毎に比較を行う。Fig.14 に変動周期 2 秒のときの最大変動幅、Fig.15 に変動周期 64 秒のときの最大変動幅を示す。導入規模は 1 軒、25 軒、これ以降は 25 軒刻みで 500 軒まで表示している。

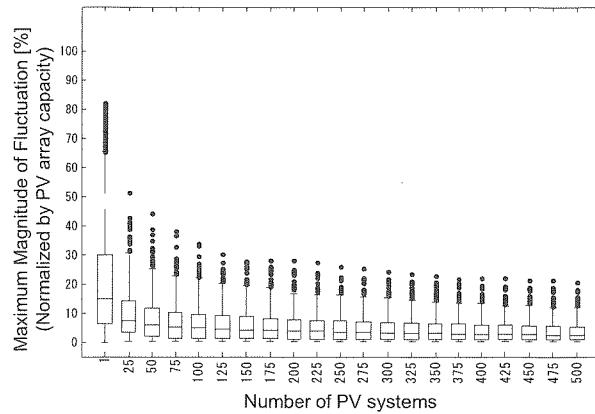


Fig.14 MMF of PV systems at 2 seconds fluctuation time

図 14 変動周期 2 秒における最大変動幅

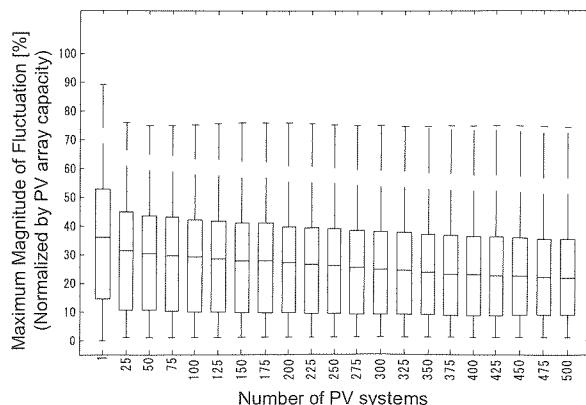


Fig.15 MMF of PV systems at 64 seconds fluctuation time

図 15 変動周期 64 秒における最大変動幅

導入規模 1 軒とそのほかの導入規模の最大変動幅の差分を最大変動幅の低減としているので、これらのグラフでは即座に比較できる。まず Fig.14 の変動周期 2 秒の場合、最大変動幅の最大値においては、導入規模 1 軒から 150 軒にかけて最大変動幅の低減が 54.17[%] と急激に低減したが、導入規模 500 軒のときは最大変動幅の低減が 61.27[%] であり、150 軒以降は 500 軒にかけて徐々に 7.10[%] の最大変動幅の低減が表れているだけであった。最大変動幅の中央値に関しては、導入規模 1 軒から 150 軒まで 10.83[%] の最大変動幅の低減があり、それ以降はほとんど変わらず横ばいであった。これらの結果から、変動が大きい日に関してならし効果は影響が大きく、中央値の日など変動が比較的小さい日はならし効果の影響は小さいことがわかる。

次に、Fig.15 の変動周期 64 秒の場合、最大変動幅の最大値は導入規模 1 軒から 25 軒まで 13.20[%] の最大変動幅の低減があり、それ以降はほとんど変わらず横ばいであった。また、最大変動幅の中央値に関しては、導入規模 1 軒では 36.26[%]、導入規模 500 軒では 21.66[%] であり、導入規模の拡大に伴い徐々に 14.60[%] の最大変動幅を低減していることがわかる。これらの結果から、変動周期が長い場合でも最大変動幅の低減は導入規模の拡大に伴い、徐々に表れていることがわかる。

ここまで最大変動幅の特性を評価するために変動周期と導入規模という軸で分けて考察してきたが、次はそれらの軸を統合し、3 次元グラフで表現する。ここで、これまでのようく箱ひげ図を使うことは難しいので、比較的起こりやすい変動という観点から最大変動幅の上位 5% の値（1 年のうちで約 18 日）を抽出し、Fig.16 のようにプロットした。底面に導入規模と変動周期、高さを最大変動幅の軸を設定した。また、Fig.14, 15 と同様に導入規模は 1 軒、25 軒、これ以降は 25 軒刻みで 500 軒まで表示している。この結果より、変動周期 2 秒から 64 秒の最大変動幅は導入規模の拡大に伴い低減しており、変動周期が短いほどに顕著である傾向がみられる。また、変動周期 128 秒以降では最大変動幅の低減が若干見られるものの、ほぼ横ばいでならし効果の影響は非常に小さい。これらのことから、導入規模の拡大に伴い、最大変動幅が低減する変動周期の領域が広がることがわかる。本実証試験地区の範囲におけるならし効果は、変動周期が約 2 分（変動周期 64 秒は 64~128 秒の範囲）までの領域で影響が大きかった。導入規模がさらに拡大した場合、ならし効果の影響がより長い変動周期に及ぶことが予想される。

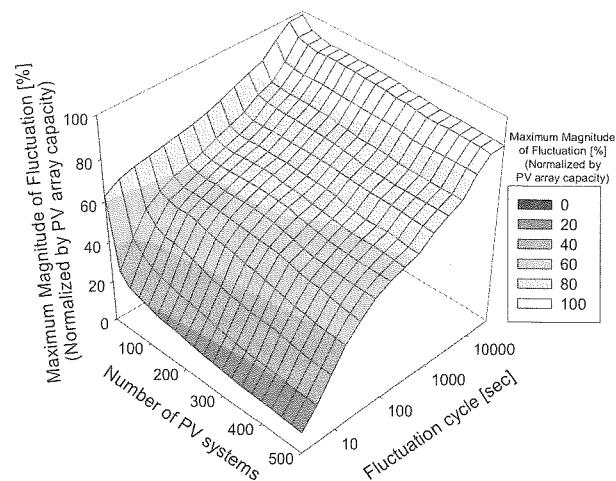


Fig.16 Fluctuation characteristic of MMF

図 16 最大変動幅の変動特性

4.2 変動エネルギー

前述のように、最大変動幅のみでは変動の分布を評価できないので、パワースペクトルから算出した変動エネルギーで評価する。そこで、最大変動幅のときと同様に変動エネルギーと変動周期の関係を Fig.17（導入規模 1 軒）、Fig.18（導入規模 500 軒）に示す。

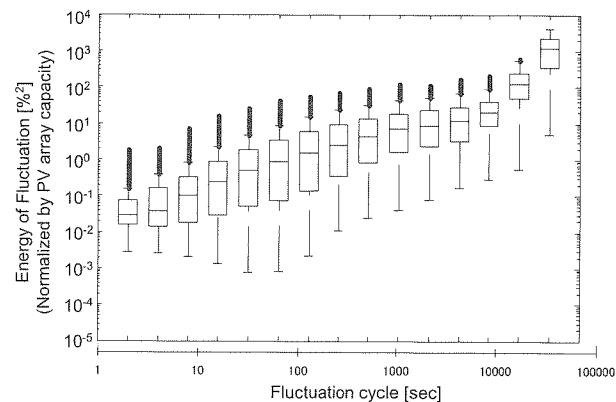


Fig.17 EF of a PV system each fluctuation cycle

図 17 導入規模 1 軒のときの変動エネルギー

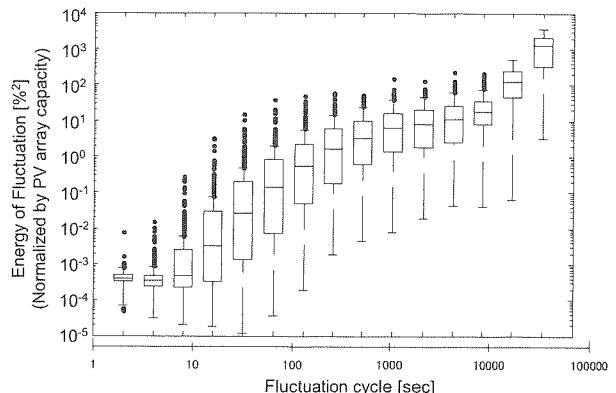


Fig.18 EF of 500 PV systems each fluctuation cycle

図 18 導入規模 500 軒のときの変動エネルギー

これらの結果からわかるように、変動エネルギーは変動周期によっては桁が大きく変わるので対数軸で示している。まず、変動エネルギーの最大値における導入規模1軒と500軒を比較する。ここで、導入規模1軒のときの変動エネルギーを EF_1 、500軒のときの変動エネルギーを EF_{500} とし、変動エネルギーの低減率は $((EF_1 - EF_{500}) / EF_1 \times 100[\%])$ で表すこととすると、変動周期64秒以下の短周期変動において変動エネルギーの低減率が57.16[%]（導入規模1軒：43.45[%²]、500軒：18.61[%²]）以上と大きな変動低減の効果があった。変動周期2秒においては導入規模1軒のとき1.86[%²]、500軒のときは0.00106[%²]と3桁も小さい値に変動エネルギーが低減し、低減率は99.94[%]であり、ならし効果の影響が非常に強いことがわかる。次に、変動エネルギーの中央値に関して導入規模1軒と500軒を比較する。中央値は最大値に比べ、1桁から2桁ほど小さい値になっている。また、変動周期128秒以下の領域において変動エネルギーの低減率が64.36[%]（導入規模1軒：1.48[%²]、500軒：0.529[%²]）以下となり、最大値よりもならし効果が影響する変動周期の領域が若干広くなっている。

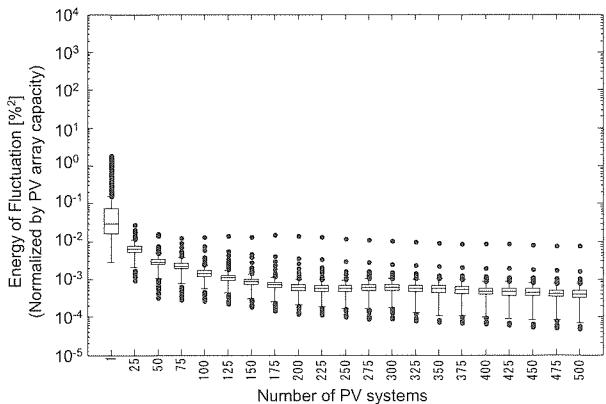
Fig.19 EF of PV systems at 2 seconds fluctuation time

図 19 変動周期 2 秒における変動エネルギー

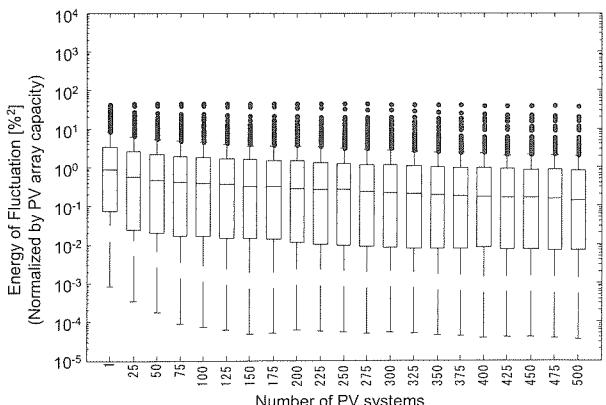
Fig.20 EF of PV systems at 64 seconds fluctuation time

図 20 変動周期 64 秒における変動エネルギー

次に変動エネルギーを導入規模毎に比較する。変動周期2秒の場合はFig.19に示しており、変動エネルギーの最大値は導入規模1軒から25軒までに1.86[%²]から0.00198[%²]へと低減し、低減率は98.93[%]と非常に大きい。これ以降では変動エネルギーはほとんど低減していない。変動エネルギーの中央値においては導入規模1軒（0.0289[%²]）から25軒（0.00624[%²]）まで低減率が78.38[%]と変動エネルギーは大きく低減するが、導入規模100軒では低減率が94.98[%]とさらに低減し、これ以降はほぼ横ばいになっている。この結果、最大値のように出力変動が激しい日は導入規模が小さくても変動エネルギーを大きく低減し、中央値のように比較的出力変動の少ない日では、導入規模が拡大に伴う変動の低減は緩やかな変化であることがわかる。

変動周期64秒のときはFig.20に示しており、変動エネルギーの最大値においては急激な変動の低減ではなく、対数軸のためほぼ横ばいにみえるが、導入規模1軒のときの43.46[%²]から500軒の18.62[%²]まで（低減率57.17[%]）緩やかに低減している。中央値に関しても同様な傾向がみられ、導入規模1軒のときの0.879[%²]から500軒の0.140[%²]まで（低減率84.07[%]）低減している。この結果から、最大変動幅と同様に変動のエネルギー、つまり変動の分布に関しても変動周期が長くなると変動の低減は導入規模の拡大に伴い、徐々に表れていることがわかる。

最後に、変動エネルギー、変動周期、導入規模の特性を変動エネルギーの上位5%の値で表現したものをFig.21に示す。変動周期2秒の変動エネルギーに注目すると導入規模の増加に伴い、変動エネルギーが大きく低減している。これに対して変動周期が長くなると、変動エネルギーの低減は小さくなり、変動周期128秒以降ではほぼ横ばいになっていることがわかる。したがって、最大変動幅のときと同様に、変動エネルギーに関してても変動周期が約2分（変動周期64秒は64～128秒の範囲）までの領域でならし効果の影響があり、さらに導入規模が拡大することでならし効果の影響がより長い変動周期に及ぶことが予想される。

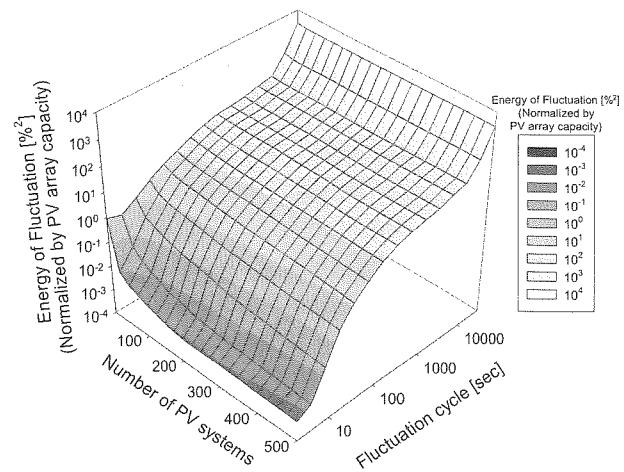
Fig.21 Fluctuation characteristic of EF

図 21 変動エネルギーの変動特性

5.まとめ

集中連系型 PV システムの変動特性を定量的に評価でき、且つ大量の計測データを高速に処理できる評価手法を開発した。変動の大きさを評価する指標である最大変動幅の算出では、最大出力変動幅の原理に基づいた算出方法と比較し、精度を十分確保した場合でも約 1800 倍の速度で計算できることを確認した。変動の分布を評価する変動エネルギーはそれ以上に速く処理できる。計算時間は、ならし効果の評価において計測地点数、計測周期、導入パターン数などが増えたときに大きく影響されるので、計算時間が短いほどより多くの検討が可能になり、ならし効果の特徴を詳細に分析する際にこの評価手法を使用することが有効であると考えられる。

これらの開発した評価手法を用い、本実証試験地区のように約 900m×700m の範囲に PV システム 500 軒が集中的に設置された場合（集中連系型 PV システム）の変動特性を変動の指標である最大変動幅および変動エネルギーに対して、変動周期や面積と導入数を考慮した導入規模を変数として評価した。その結果、集中連系型 PV システムの変動の分布を統計的に示すことができ、約 2 分以下の短周期の変動成分において顕著なならし効果が発生していることを明らかにした。

6.今後の課題と展望

本研究の成果として導入規模の拡大によりならし効果が影響する変動周期の範囲が長周期側へ広がっていくことを定量的に明らかにしたが、今後、電力系統に与える影響として負荷周波数制御（LFC：Load Frequency Control）⁵⁾などの周波数調整力を評価対象とする場合、さらに広範囲のならし効果を詳細に検討する必要がある。例えば、LFC が担当している変動周期範囲（数分から十数分）を平滑化できるエリアサイズを明確にすることや、電力供給エリア内のならし効果の特性を詳細に分析する必要があると考えられる。このような検討を行うことで、PV システムの健全な導入拡大を促すことができると考えられる。

参考文献

- 1) IEA: "Key World Energy Statistics 2007- Key World Energy Statistics 2007", http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf (2007)
- 2) IEA Photovoltaic Power Systems Programme: "Trends in Photovoltaic applications in selected IEA countries between 1996 and 2006"
- 3) 杉渕、上迫、黒川：「面的拡がりをもった太陽光発電システムの発電特性に関する研究」，平成 7 年 電気学会全国大会，No.1795 (1995)
- 4) 篠輪、大谷、津田、作田、黒川：「地域面平均日射の推定による太陽光発電システムの kW 値値分析」，太陽／風力エネルギー講演論文集 1998，p.17-20 (1998)
- 5) 柳川、加藤、田畑、鈴置：「日射量の多地点同時観測結果に基づく PV システム出力変動の LFC への影響評価」，電学論 B，123 卷 12 号，p.1504-1512 (2003)
- 6) 村田、山口、大谷：「広域的に多数台導入された太陽光発電に関する出力変動幅の推定法」，電学論 B，127 卷 5 号，p.645-652 (2007)
- 7) 村田：「電力貯蔵による分散電源の出力変動抑制」，第 2 回分散型エネルギーシンポジウム講演資料，p.43-48 (2005)
- 8) NEDO 技術開発機構：「太陽光発電システム実用化技術開発 「太陽光発電システムの実証研究」（高密度連系技術の研究）」，平成 12 年度 NEDO 技術開発機構 委託業務成果報告書，平成 13 年 3 月 (2001)
- 9) 西川；「集中連系型太陽光発電システム実証研究の概要」，太陽／風力エネルギー講演論文集，p.51～56 (2003)
- 10) NEDO 技術開発機構：「風力発電電力系統安定化等調査」，平成 13 年度調査報告書，2002

謝辞

本研究は、NEDO 技術開発機構の委託研究「集中連系型太陽光発電システムの実証研究」の一環として実施した。関係者各位に感謝の意を表する。