

1. RE の出力変動と周波数調整

RE の出力把握と出力予測

再生可能エネルギー（RE, Renewable Energy）が扱いにくい 1 つの理由は自然条件によって出力が不随意に変動することです。RE の出力予測とは、気象予報などを利用して近未来の RE の出力を予測することで、その重要性が近年クローズアップされております。予測ですから当然のこととして誤差があり、個々の予測手法ごとの誤差を知っておくことも重要です。

RE の出力把握とは少々意味がわかりにくい言葉ですが、おおよそ次のようなことです。広域に多数分散配置する RE の現在出力を全部計測し、合計して、全体の出力を知るとというのが出力把握の正道ですが、RE が多数・大量普及した場合、そのコストは並大抵のものではないでしょう。実用的・経済的には少数のサンプル RE の出力だけ計測して全体の出力を推定できないか？と虫のよいことを考えるわけで、これも近似的ではありますが、出力把握です。過去から現在に至る現象の把握ですから、未来を扱う予測よりは誤差が少ないでしょう。加えて出力予測において予測誤差を計算するには RE 合計出力実績が必要であり、出力把握がこれを与えてくれますから、出力把握は RE の出力変動を扱ううえで最も根源的な営みといえます。

RE の出力把握の方法は図 1.1 に示すとおり、きわめて簡単です。倍率は、RE 全体の物量がサンプルの物量の何倍あるかで、容易に把握できます。「均し効果」とは「全体の変動： $\Delta(\Sigma P)$ 」が「個々の変動の和： $\Sigma(\Delta P)$ 」よりもずっと小さいことで、定性的には、平成 12 年には既に広く知られておりました。しかし定量的には平成 24 年現在でもよくわかっていないようです。

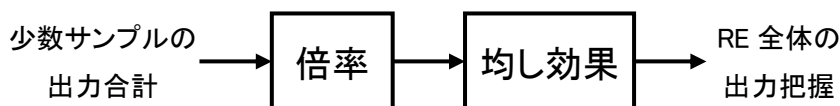


図 1.1 出力把握の方法

伝統的な分析方法・・・帰納法

均し効果の解明にあたっては、まず、日射量の時間的変化を観測します。一例を図 1.2 に示します。これは 2010 年 3 月から 5 月で最も日射量変動が激しかった日の例です。

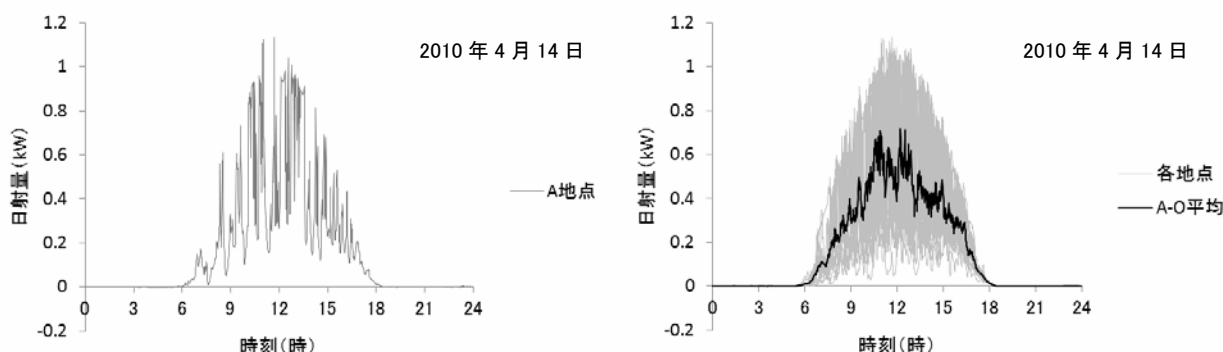


図 1.2 北陸 15 地点の日射量

15 地点の中の 1 つ A 地点の変動振幅は最大日射に匹敵するほどあります。A～O の 15 地点全部を重ねて描くと、細い線を使っても、画面が灰色で塗りつぶされ、各地点の日射量変動の凄さを示しています。ところが地域全体では、つまり 15 地点の平均をとれば、細かな変動はずっと少な

くなっています。均し効果を目で見て実感できます。しかし定量的なことは、わかりません。

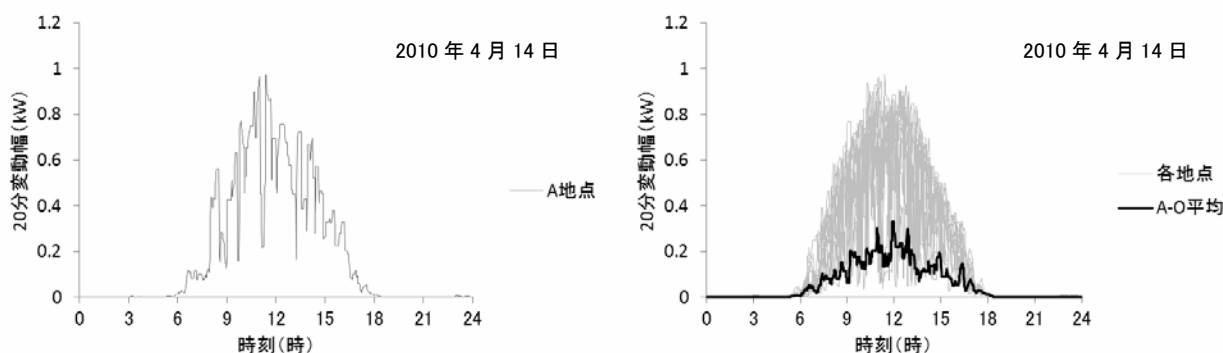


図 1.3 北陸 15 地点の日射量 20 分変動幅

定量的な把握のために最初に行われたことは、20 分という時間窓の中の最大値と最小値の差をとることでした。4 月 14 日の場合は図 1.3 のようになります。全体とは「全体の変動： $\Delta(\Sigma P)$ 」を地点数で割って規格化した値です。全体の変動が均されていることが見て取れます。

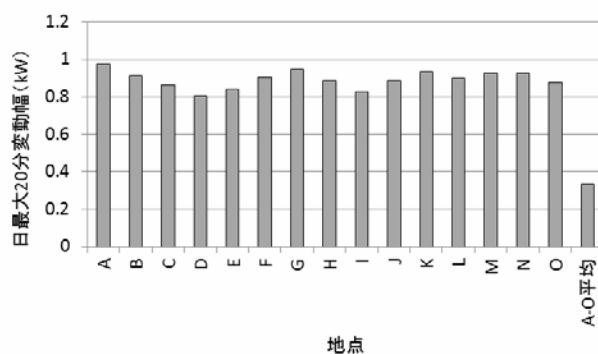


図 1.4 日最大 20 分変動幅

さらにここで一日のうちで最大の 20 分変動幅をとります。数値は以下の通り。

$$15 \text{ 地点の各変動幅の平均値は } \Sigma(\Delta P)_{1\sim 15} / 15 = 0.894342$$

$$\text{全体 15 地点合計変動幅の 1 箇所換算は } \Delta(\Sigma P_{1\sim 15}) / 15 = 0.332373$$

ここで「均し効果」を「全体の変動： $\Delta(\Sigma P)$ 」を「個々の変動の和： $\Sigma(\Delta P)$ 」で割り算したもの

$$\text{均し効果} = \frac{\Delta(\Sigma P)}{\Sigma(\Delta P)}$$

と定義してもよいでしょう。この事例では

$$\text{均し効果} = \frac{\Delta(\Sigma P)}{\Sigma(\Delta P)} = \frac{\Delta(\Sigma P_{1\sim 15}) / 15}{\Sigma(\Delta P)_{1\sim 15} / 15} = \frac{0.332373}{0.894342} = 0.371639$$

となります。全体の変動は各地点の変動の 37% に均されています。もし各地点の変動が完全に独立事象であるなら、つまり完全にランダムであるなら、均し効果は

$$\text{均し効果} = 1 / \sqrt{15} = 0.258199$$

になるはずだということがわかっております。この事例で用いた「日最大 20 分変動幅」という指標は、完全ランダムに近いと思われる速い変動を意識したものではありませんが、ランダム変動を

表わす変数ではないということがわかります。これは当然で、各地点で同期傾向にある遅くて雄大な変動の一部も 20 分変動幅に含まれてしまいますから。

またこの事例で導かれた 37% という均し効果は、いついかなる場合にも適用できるものではなく、この事例特有の値であり、他の事例では観測からやり直す必要があります。本例では A～O の 15 地点は地理的に順番に並んでいるわけではおりません。そこで例えば前半の A～G の 7 地点について均し効果を求めると均し効果

$$\text{均し効果} = \frac{\Delta(\Sigma P)}{\Sigma(\Delta P)} = \frac{\Delta(\Sigma P_{1\sim 7}) / 7}{\Sigma(\Delta P)_{1\sim 7} / 7} = \frac{0.550291}{0.893004} = 0.616225$$

は 62% ほどになり、15 地点の 37% とは随分違った値になってしまいます。このときの 7 地点個別および全体の日射量を図 1.5 に、20 分変動幅を図 1.6 に示します。15 地点のときとは様相が違っていることがわかります。

こうになってしまうのは、伝統的分析法が個々の事例を積み上げる帰納法をとっているからです。帰納法では、あらゆる事例に適用できる一般的な理論は導きようがありません。経験則なら導くことはできるでしょうが、そのためには十分な経験を積みねばなりません。結局、多量のデータを得るために、長期かつ広範囲な観測をする高価な研究になり、しかも、今すぐ均し効果の正体を把握したいという要望には応えることができません。

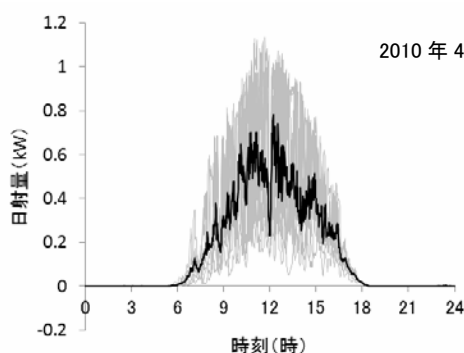


図 1.5 7 地点の日射量

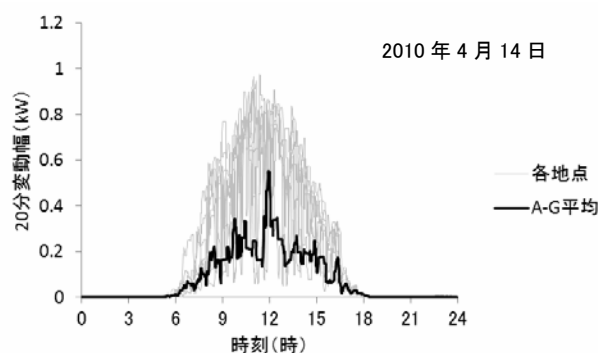


図 1.6 7 地点の 20 分変動幅

革命的な方法……演繹法としての「遷移仮説」^{(1), (2), (3)}

帰納法に対して演繹法があります。これは、「RE 出力変動とはこういうものだ」、「均し効果とはこういうものだ」、と頭から決め付けた「仮説」を立て、仮説から論理的に導かれる結果が観測事実をよく説明できていれば仮説は誤っていない、とする科学の最も重要な思考様式です。仮説を立てるには現象を支配している自然法則を洞察することが不可欠です。洞察不十分により誤った仮説を立てれば、検証ではなく「反証」されて、その仮説は「クロ」と判定され、消滅します。

著者が提唱している「遷移仮説」は次のように数式表現できます。

$$\text{均し効果} = \frac{\Delta(\Sigma P)}{\Sigma(\Delta P)} = \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{N}}{1 + j T_x f} \right| \quad (1.1)$$

ここに j は虚数単位、 f は変動の速さ、 N は RE の数です。 T_x は遷移周期という地域固有の定数で、この周期より遅い変動は同期しており、それより速い変動は同期が崩れ始めランダム変動へと遷移していく、と仮定しています。遷移の傾きは自然界に最も普通に見られる速さの -1 乗と仮

定します。Tx は地域の寸法が大きいほど大きな値をとります。

いきなり結論を書いてしまいましたが、ここに至るまでには長い道のりがあります。まず、遅い同期変動と速いランダム変動については表 1.1 のように、性格がはっきりわかっております。

表 1.1 遅い変動と速い変動の性質

	遅い変動	速い変動
2 つの RE 変動の関係	同期	ランダム
複数 RE の変動	各 RE 変動の算術和	各 RE 変動のピタゴラス和
大量 RE の変動	RE 総容量に比例	RE 総容量の $\sqrt{\quad}$ に比例

科学の得意は「要素還元」で、未知のことも複数の既知のことで説明しようとする態度です。RE の変動も遅い変動と速い変動の合成で説明しようと考えます。合成を司る自然法則が見出せれば、こちらのものです。

均し効果の強さに影響する要素を重要な順にあげると次のようになります。

1. 変動の速さ 速い変動ほど均し効果が強い
2. 地域の大きさ 地域が大きいほど均し効果が強い
3. RE の数 数が多いほど均し効果が強い
4. RE 分布の均等さ 分布が均等に近いほど均し効果が強い
5. その他 今のところ統計的ノイズと考えざるをえない

どうしてこの順位になるかを述べます。まず、RE 出力変動は、あらゆる速さの変動が同時進行しております。1.1 表に示すように、変動は速さによって性格が大きく変わります。計算においてもあらゆる速さの変動を同時進行で扱う必要があり、従って変動速さを主変数、つまりグラフの横軸にとる必要があります。地域の大きさと RE の数は、1 つの計算では一定なのが普通ですから、助変数、つまりパラメータとして扱えばよいことになります。もっとも重要な要素を考慮していないのに、RE 分布には多くの研究者が拘るのですが、不均等分布になると均し効果が少し減退して速い変動成分が少し増える程度の違いにしかならないことは試算しております。

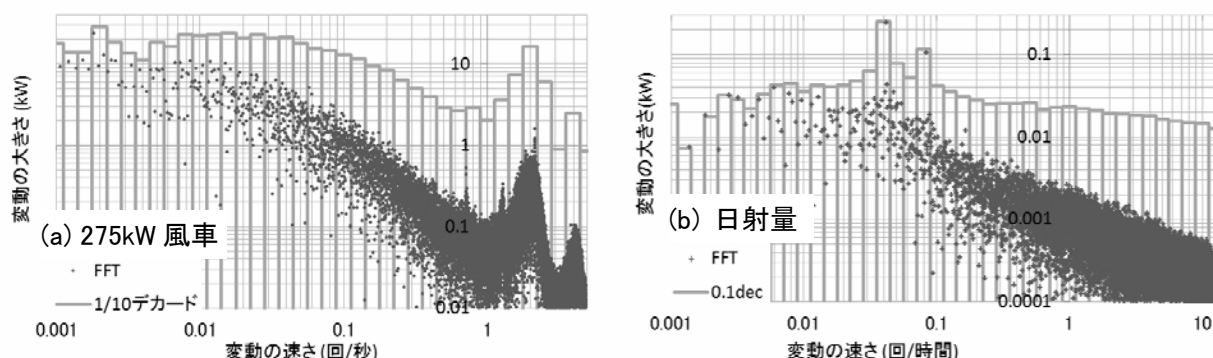


図 1.7 RE 出力変動スペクトルの例

横軸に変動速さ（周波数）をとった表記法はスペクトルになります。時系列データをスペクトルに変換するには FFT（Fast Fourier Transform）が使われますが、FFT の結果は離散スペクトルです。図 1.7 に定格出力 275kW の中規模固定速風車の FFT 結果を紹介しますが（両対数グラフに書くのが一般的です）、たいした意味もない速い変動のデータの数だけが膨大になり、紙面が点で

埋め尽くされております。これでは何を表記しているか、わかりません。そこで何らかのスムージング処理をしたくなるのですが、みだりに行うのは物理的意味が失われるので禁物です。

ここでは意味のあるスムージングの方法として、変動速さ対数軸で 10 倍の区間を 10 等分したバンドに区分し、各バンドに含まれる変動成分振幅のピタゴラス和を、そのバンドの高さとします。これでスペクトルはバンドごとに柱として表記され、各バンドを並べて描いたものが 1/10 デカード・バンド法、別名 1/3 オクターブ・バンド法と呼ばれるスペクトルです。1/10 デカード法では、自然界の変動でよく見られる「 $1/f$ ゆらぎ」が平坦に表わされます。図(a)では 0.1 回/秒より遅い変動は平坦になっています。速い変動は速さの -1 乗に比例して減衰していきますが、これも自然界の変動でよく見られることで、この場合は羽根の慣性によるものです。もっと速い変動にピークがあるのは塔体影効果のためです。図(b)では 24 時間と 12 時間周期に日射の日変動によるピークがある他はほぼ平坦です。1/10 デカード法はこのような美点のため騒音や音響の分野で賞用されており、IEC や JIS に規格があり、これに準拠した「スペクトラム・アナライザ」という計測器が市販されておりますが、なぜかスペクトル分析の教科書には記載されておられません。なお、この柱を並べた表記法は面倒このうえないので、以降は、柱の頭の中点を折れ線でつないだ略式表記としますが、そのところは図のようなものとご理解ください。

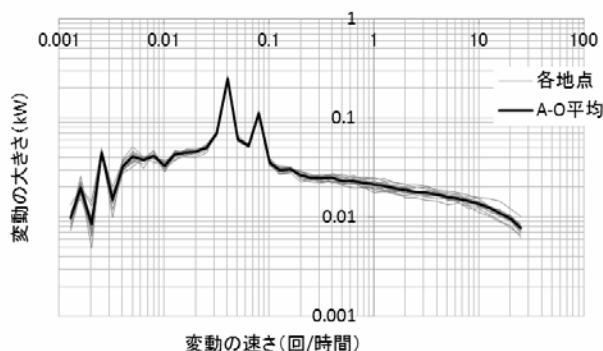


図 1.8 北陸 15 地点の 3～5 月スペクトル

2010 年 3 月から 5 月の春の 3 ヶ月間の連続時系列データを与えて FFT, 1/10 デカード法を用いて北陸 15 地点の日射量スペクトルを作成した結果を図 1.8 に示します。15 地点のスペクトルは線が重なるほど均一です。つまり 3 ヶ月という長期平均で言うなら、日射量変動はどの場所でも似たようなものであり、場所固有の違いを探しても無駄、つまり観測点をあまり増やす必要はないということ、この結果は物語っています。

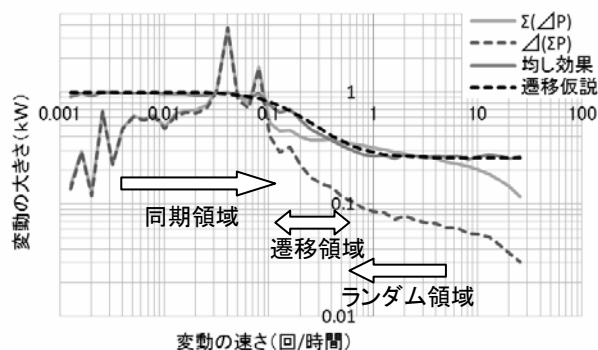


図 1.9 均し効果と遷移仮説

遷移仮説による均し効果の定義である(1.1)式で Δ を付した変化分としてスペクトルを用いても

かまいません。20 分変動幅の場合は均し効果が 1 個の実数だったのが、スペクトルの場合は変動の速さ f の関数になるだけの違いです。北陸 15 地点のスペクトルで均し効果を算定すると図 1.9 の結果となりました。 T_x を 7.2 時間とすれば遷移仮説が現実の均し効果に最もよくフィットし、かなりよく言い当てていると言えるでしょう。割り算前の $\Sigma(\Delta P)$ や $\Delta(\Sigma P)$ には 24 時間周期と 12 時間周期に太陽光特有の鬼の角のような 2 つの鋭いピークがあります。しかし割り算することで遷移仮説、均し効果からはこの鋭いピークが消えています。3 か月という長期のスペクトルをとったのは、24 時間周期を超える遅い変動が同期していることを確認したかったためですが、図の通り、同期していることが確認でき、ねらい通りです。

遷移仮説では観測データから求めるべきパラメータは T_x の 1 個だけです。しかもこの T_x は地域固有の定数で、RE の数が増えても変化せず、季節によって大きく変わることがありません。ということは本質を突いているということです。帰納法で求めた均し効果係数が場合によって大きく変わるのとは大違いです。RE の数が増えても T_x が変わらない理由は次のように説明できます。いま図 1.10 の地域 A をカバーするように既設 2 地点 P、Q があります。そこへ新地点 R ができました。R から最寄の既設地点、この場合は P までの距離は既設 2 地点間の距離 D より必ず短くなります。遷移周期 T_x より遅い変動は既設 P、Q の 2 地点で同期しています。新設 R 地点は Q 地点よりも P 地点に近い。ゆえに R 地点の変動は P 地点の変動と同期している、ということになります。こうして地域 A 内に新規地点がいくら増えても、遷移周期 T_x より遅い変動は既設 2 地点の変動と同期しているはずで

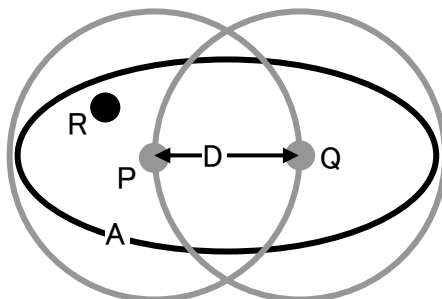


図 1.10 T_x が変わらない理由

(1.1)式の表現は一種のローパスフィルタですが、絶対値をとっているため、位相回転がない点がユニークです。普通のローパスフィルタは慣性に相当する物（例えばコイル）で均すために必ず何がしかの時間（位相）遅れを伴い、電気回路で作ると式の絶対値を除いたものになります。しかし均し効果は RE の地理的分散により瞬時に達成されるものゆえ、時間（位相）遅れを伴いません。もし(1.1)式の絶対値を外して遷移仮説に位相回転を持たせると、あとで登場する大量導入時の日出力曲線推定で、大きな歪みができてしまいます。

N 地点から M 地点に増えたとき

遷移仮説の定義である(1.1)式から N 地点合計出力の変動 $\Delta(\Sigma P_{1\sim N})$ は次のように書けます。

$$\Delta(\Sigma P_{1\sim N}) = N (\Delta P)_{ave} \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{N}}{1 + j T_x f} \right| \quad (1.2)$$

ここに $(\Delta P)_{ave}$ は 1 地点の平均スペクトルで、図 1.8 により各地点の長期スペクトルがほぼ同じであることから、各地点のスペクトルの合計 $\Sigma(\Delta P)_{1\sim N}$ を $N (\Delta P)_{ave}$ と表現することの妥当性は了解できるでしょう。RE の数が増えて M 地点になったときの合計出力の変動 $\Delta(\Sigma P_{1\sim M})$ は次のように書けます。

$$\Delta(\Sigma P_{1\sim M}) = M (\Delta P)_{ave} \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{M}}{1 + j T_x f} \right| \quad (1.3)$$

(1.3)式を(1.2)式で割り算すれば、RE が N 地点から M 地点に増えたときのスペクトルの増倍率が次のように得られます。

$$\frac{\Delta(\Sigma P_{1\sim M})}{\Delta(\Sigma P_{1\sim N})} = \frac{M}{N} \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{M}}{1 + j T_x f / \sqrt{N}} \right| \quad (1.4)$$

いま北陸 15 地点のうち富山市の A、金沢市の C、福井市の E の 3 地点の観測データしか持っていないものとしします。図 1.11 のように、精度は若干落ちますが、3 地点からでも T_x を求めることはでき、7.8 時間となりました。この T_x を用いて 3 地点合計スペクトルに(1.4)式の増倍率を掛算して 15 地点合計スペクトルを求めることができます。実は我々は 15 地点合計の真のスペクトルを知っているわけですから、推定値と真値を比較することができます。結果は図 1.12 の通りです。元が 3 地点と少数なわりには、なかなか良好な推定精度です。精度が良い理由は、図 1.8 に示したように、長期スペクトルに地点差が少ないことにあってよいでしょう。

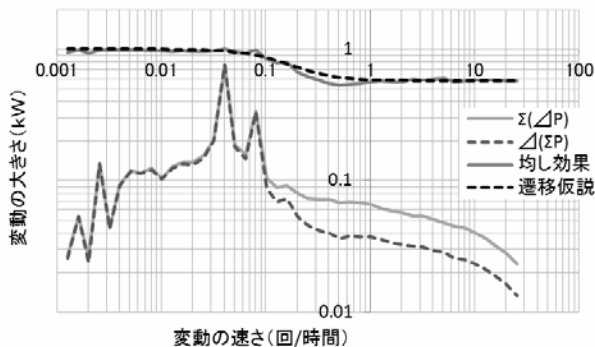


図 1.11 3 地点の均し効果と遷移仮説

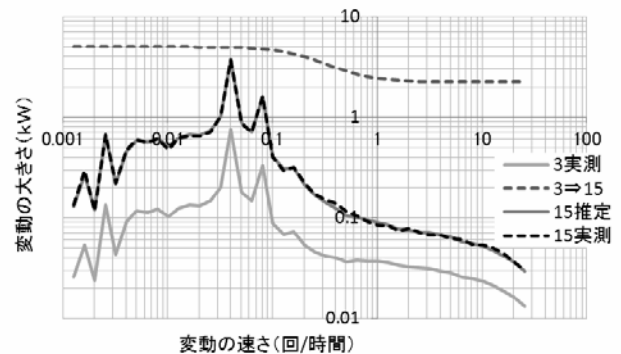


図 1.12 3 地点から 15 地点の推定と実測

このように、観測事実と照合できる帰結を元の仮説から論理的に導くことができれば、照合により仮説の信憑性が検証できます。場合によってはダメよ、と反証されることもあります。一例でもよいから検証できることは科学の仮説にとって非常に重要なことです。検証されていない仮説は、ただの放言にすぎません。

時系列データへの適用

RE が N 地点から M 地点に増えたときの出力変動の増倍率が(1.4)式の一つのゲインつきローパスフィルタの形に書けるということは、スペクトルだけでなく、時系列データにもこの増倍率が適用できることを意味しております。ただこのフィルタは位相回転がないという特殊な性格を持っているので、計算には一工夫を要します。これは図 1.13 のやり方でよいでしょう。 N 地点の時系列データを一旦フーリエ変換によりスペクトルの形にして、これに増倍率を適用し、フーリエ

逆変換により M 地点の時系列データに戻します。ここで注意すべきは、ここでのフーリエ変換の結果はすべてのデータが物理的意味を持っているので、1/10 デカード法のようなスムージングをしてはいけないこと、位相情報も意味があるのでゼロにしてしまわないことです。

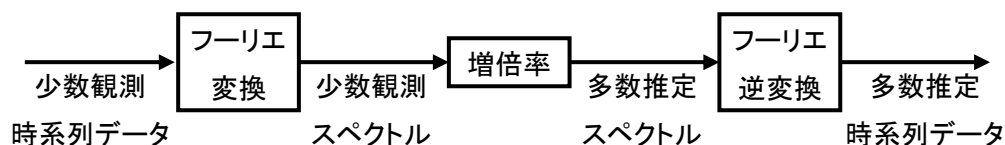


図 1.13 時系列データへの遷移仮説の適用

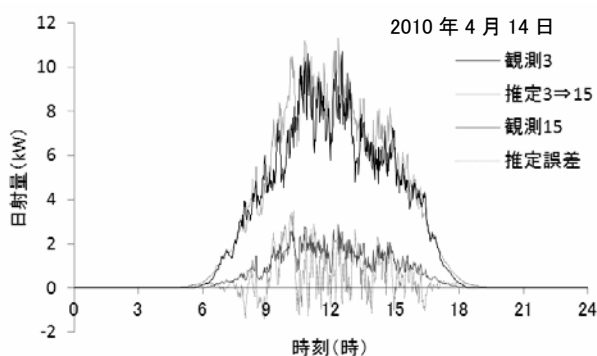


図 1.14 変動の大きい日の日射量推定と実測

この方法では、長期スペクトルの場合と違って、 N 地点の時系列データは特定の 1 日のものを使用します。その日の T_x は 3 か月長期平均の T_x とは少々異なるかもしれません。また特定の 1 日では各地点の日射に若干差があるでしょう。長期平均の日射量だから地点差が希釈されていると考えるべきでしょう。従ってこの方法は長期スペクトルの場合ほど精度は良くないはずです。試しに A, C, E の 3 地点合計から 15 地点合計を推定してみた結果を図 1.14 に示します。15 地点観測値の 6 時から 18 時の平均日射量が 4.82kW で、推定誤差が RMSE で 1.03kW ですから、RMS 誤差率は 21.3%にもなります。但し図を見る限りでは、そう大きな誤差には見えません。それに推定の元がわずか 3 地点ということは現実にはないでしょう。北陸ならば既にある 15 地点を元に推定するのが当然です。同じ 5 倍の RE を推定するにしても、15 地点から 75 地点を推定すれば、精度はもっとよくなると期待されますが、それだけの観測地点をもっていないので、現在のところ、検証できるのはここまでです。

大量導入時の出力把握

ここまでくれば RE 大量導入時の出力把握が見えてきます。2030 年に全国に PV が設備容量で 5300 万 kW 普及すると、系統容量比で北陸には 154 万 kW 入ってきます。全部が単機 4kW の住宅用と仮定すると、基数 M は

$$1540000\text{kW} / 4\text{kW} = 385000 \text{ 基}$$

であり、 $N = 15$ 基の現有データから $M = 385000$ 基の出力を推定すればよいわけです。 T_x は 15 地点での観測値 7.2 時間を使います。

大量導入時には PV 出力変動を需要変動と比較したくなります。この際にスペクトルにおいて

注意すべきは、PV は夜間には停止しており、晴天の日には図 1.15 のような日出力曲線を描きます。ほぼ正弦上半波ですから、一日平均の出力は正午の $1/\pi$ になります。PV の出力変動は気象要素と晴天時出力の掛算と考えることができます。従ってもし一日中太陽が南中していれば、スペクトルは夜も含めた長期スペクトルの π 倍になるはずですが、PV 出力変動と需要変動を公平に比較するには PV 出力変動を π 倍する必要があります。

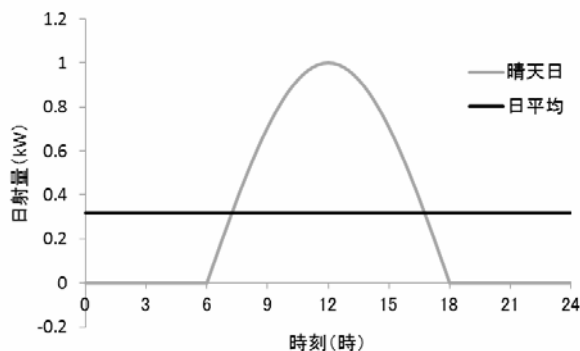


図 1.15 晴天日の日射量推移

このような点に注意して π 倍した PV 出力変動のスペクトルにおいて 15 地点観測データから大量導入時を想定すると図 1.16 のようになりました。あまりにも M/N 比が大きいので、15 地点は kW 単位、大量導入と需要は MW 単位で記載しております。周波数調整の対象となる周期 1 時間以下の速い変動については、大量導入された PV の出力変動は需要変動よりやや小さいことがわかります。あれほど大騒ぎされた周波数調整の問題は、実はそう重篤な問題ではないことが、遷移仮説を援用することで一目瞭然になりました。

また変動が最も激しかった日の時系列データから大量導入時の日出力カーブを推定すると図 1.17 のようになりました。最も変動が激しかった日でも、この程度に均されていますから、速い変動によって系統運用が著しく困難になるとは考えにくいでしょう。むしろ朝の需要の立ち上がりにあわせて PV は出力を増加するので、助けになる面もあります。

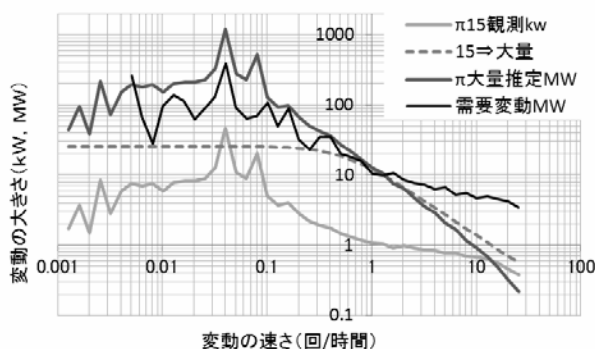


図 1.16 大量導入時の推定スペクトル

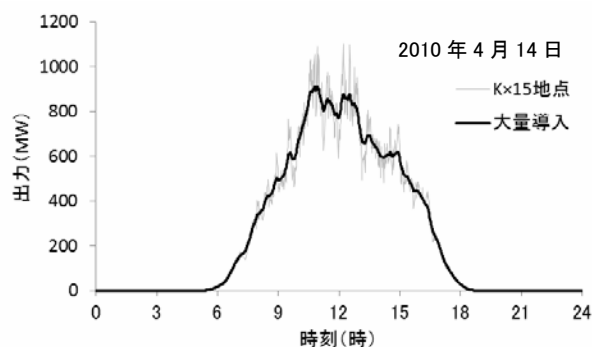


図 1.17 大量導入時の推定日出力カーブ

大量導入時の周波数調整の対象となる数分から 1 時間周期の変動は、図中に点線で示した増倍率関数が右下がりの -1 乗特性になっている「遷移領域」の中にあることがわかります。もっと遅い変動の「同期領域」なら全ての変動が同期、もっと速い変動の「ランダム領域」なら全ての変動がランダムとして扱って差し支えないのですが、「遷移領域」の変動は同期でもランダムでもない中間的なものです。先に示した 15 地点の均し効果（図 1.9）では周期 1 時間より速い変動はランダム領域の中にありました。ということは、RE の数が増えるほど遷移領域が速い変動の方へ拡

大し、その分、ランダム領域が縮小するということです。15 地点のスペクトルを見て 1 時間周期より速い変動はランダムであると早とちりしては、大量導入時の変動を楽観的に見積もってしまいます。こういう次第ですから、大量導入するほど帰納法の手には負えなくなってきました。

観測によらず T_x を求める方法

遷移仮説は演繹法であると宣伝してきましたが、唯一、遷移周期 T_x だけは観測から求める必要がありました。そこに部分的に帰納法の要素があります。もし地域の寸法から T_x を定めることができれば、観測は検証のため以外には一切必要なくなり、完全な演繹法になります。

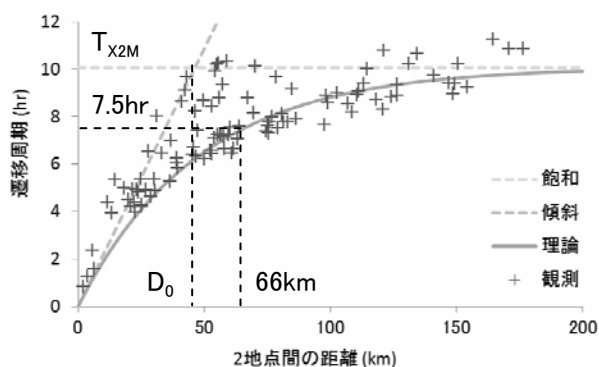


図 1.18 2 地点距離と遷移周期(広域)

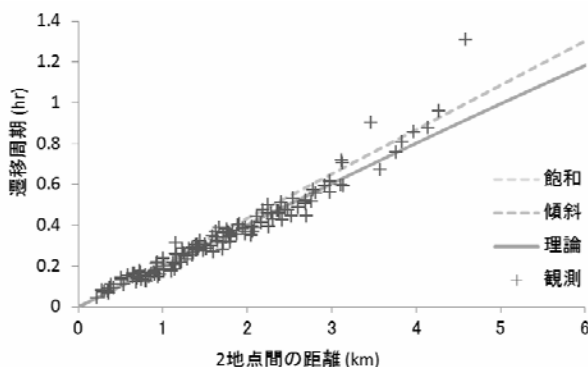


図 1.19 2 地点距離と遷移周期の(小エリア)

一つの方法として、15 地点の観測結果からは ${}_{15}C_2 = 105$ 組の 2 地点の間隔と遷移時間の関係が得られます。それらを図示すると図 1.18 のようになります。その傾向を説明する理論式として次式を想定してみます。 D は 2 地点間距離、 T_{X2} はその遷移周期です。

$$T_{xx} = T_x \{1 - \exp(-D / D_0)\} \quad (\text{hr}) \quad (1.5)$$

式には 2 個のパラメータがあります。 T_{X2M} は十分離れた 2 地点の遷移周期であり、ここでは $D > 130\text{km}$ なるデータの平均値 10.08km を用います。 D_0 は、 D が小さい領域においては(4)式が近似的に $T_{X2} \doteq T_{X2M} D / D_0$ という直線になりますが、その傾きを決めるものです。 D_0 を同定するには D の小さい観測データを必要とします。1 フィーダーの供給範囲という狭い地域において同様に観測・分析した結果を図 1.19 に示します。17 地点の観測から ${}_{17}C_2 = 136$ 組のデータが得られます。この狭い地域のデータを用いて観測値と理論式の合計 2 乗誤差が最小となる D_0 を求めると 48.05km となりました。

D が小さい領域で T_{X2} が D に比例する理由を考えてみます。可住地面積 $S \text{ km}^2$ の地域に間隔 $D \text{ km}$ のメッシュ状で PV があると、PV 数は $N = S/D^2$ です。これら PV の変動がランダムに遷移し終える変動周期 T_Y はある遷移周期 T_{XX} を仮定して

$$T_Y = T_{XX} / \sqrt{N} = T_{XX} / \sqrt{(S/D^2)} = T_{XX} D / \sqrt{S}$$

です。2 地点の場合、遷移周期 T_{X2} はその $\sqrt{2}$ 倍ゆえ

$$T_{X2} = T_{XX} D / \sqrt{(S/2)}$$

となり、 T_{X2} は D に比例します(証明おわり)。これでようやく遷移仮説で-1 乗の傾きを仮定したことの妥当性が一応検証されたと思います。

なお T_{XX} は、北陸地域の場合、

$$T_{XX} = (T_{X2M}/D_0) \sqrt{(S/2)} = (10.08/48.05) \sqrt{(4300/2)} = 9.7 \text{ hr}$$

と計算され、 T_{X2M} に近い値になっていますが、これは単なる偶然の一致に過ぎません。

北陸地域の寸法は東端の泊から西端の敦賀まで直線で 198km あります。図 1.10 では地域をカバーする 2 地点間隔を長径の 1/3 にとればよいことが分かります。198km/3 = 66km で、図 1.18 から $D = 66\text{km}$ に対応する T_X は約 7.5 時間ですから、理論はよく整合がとれています。なお北陸地域について T_X の季節的な変動⁽⁸⁾ や変動の激しい日⁽⁹⁾ の T_X を求めてみましたが、7.5 時間程度から大きく外れることはありませんでした。

不均等分布⁽⁴⁾

RE の分布が合計出力に大きく影響を与えると本気で考えている研究者が大勢います。場所によって RE の出力が大きく異なるなら確かにそうでしょう。しかし少なくとも長期平均的には図 1.8 に示したように、場所による RE 出力の違いは大きくありません。そうすると残るのは不均等分布が均し効果を減殺するため、速い変動が増えることくらいで、その影響は地域の寸法や RE の数ほどには RE 合計出力に影響しないと思われます。

遷移仮説を少し拡張して不均等分布を考慮することができます。例えば図 1.20 のように RE が密なコアと疎なスペースからなるブロックが連なっている規則的なコア・スペース構造を想定します。

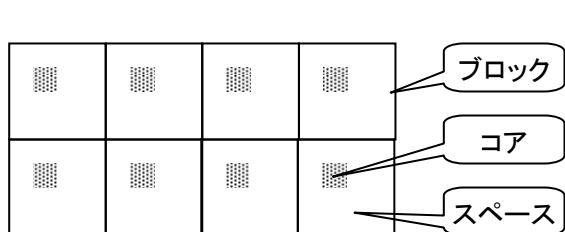


図 1.20 コア・スペース構造

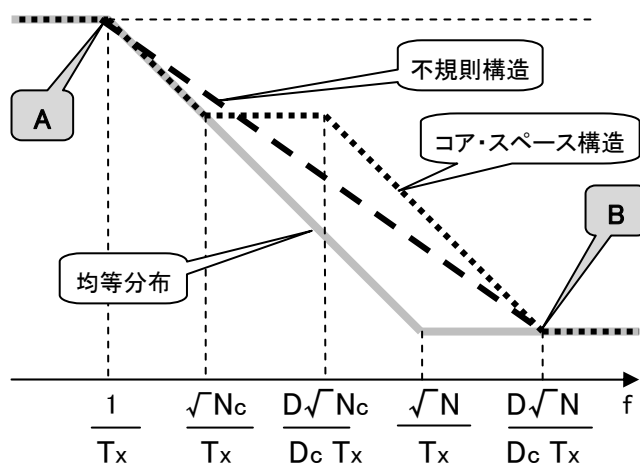


図 1.21 不規則分の均し効果

コア・スペース構造の均し効果は図 1.21 のようになり、速い変動は均等分布の場合より増えます。ここに N は RE の数、 D は均等分布の場合の RE 間隔、 N_c はコアの数、 D_c はコア内の RE 間隔です。当然 N_c は N よりずっと少なく、 D_c は D よりずっと短くなります。

このときの均し効果は次のように計算できます。右辺の左半分はブロック間の均し効果、右半分はブロック内の均し効果を表わしています。

$$\text{均し効果} = \left| \frac{1 + j \frac{T_x f}{\sqrt{N_c}}}{1 + j T_x f} \frac{1 + j \frac{D_c T_x f}{D \sqrt{N}}}{1 + j \frac{D_c T_x f}{D \sqrt{N_c}}} \right|$$

可住地面積 4300km^2 の北陸地域に単機 4kW の RE が 154 万 kW 普及した場面を想定します。
RE の数は

$$N = 1540000\text{kW} / 4\text{kW} = 385000$$

です。1 ブロックの大きさは周囲の田野を含めて 10km^2 とします。するとコア数は

$$N_c = 4300\text{km}^2 / 10\text{km}^2 = 430 \text{ 個}$$

です。均等分布の場合の RE 間隔は

$$D = \sqrt{(4300\text{km}^2 / 385000)} = 0.105683 \text{ km}$$

です。コア内の RE 間隔は先に仮定した通り

$$D_c = 0.02 \text{ km}$$

です。これでパラメータはそろいました。この条件でスペクトルは図 1.22 のようになりました。需要変動と比較するため RE 変動は π 倍してあります。数分周期の速い変動は均等分布の場合の約 3 倍になっていますが、それでも 1 時間周期の速い変動が需要変動を上回りことはありません。

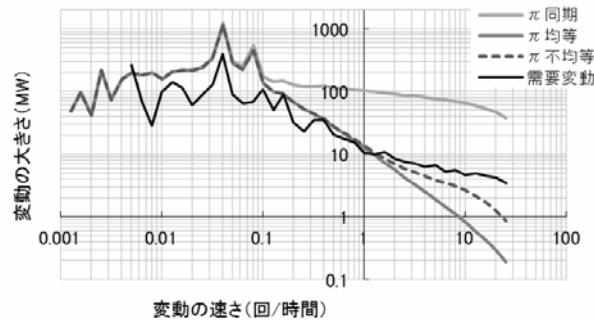


図 1.22 コア・スペース構造のスペクトル

しかし現実の住宅分布をみていると規則的なコア・スペース構造は見られず、不規則な不均等分布になっております。この場合、確実にわかるのは図 1.21 の A 点と B 点だけです。ならば A 点と B 点を直線で「えいやっ」と結んでやっても実態とそう変わらないでしょう。数式では(1.6)式のように表記されます。

$$\text{均し効果} = \left| \frac{1 + j \left(\frac{D_c T_x f}{D \sqrt{N}} \right)^K}{1 + j (T_x f)^K} \right| \quad (1.6)$$

この式には未知のパラメータ K があるので、これを決定せねばなりません。ここで、非常に速いランダム領域での変動の大きさは(1.6)式で算出したものと同じでなくてはならないことに注目すれば、パラメータ K は次の条件を満足しなければなりません。

$$\left(\frac{D_c}{D\sqrt{N}} \right)^K = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

ゆえに、パラメータ K は次のように求まります。

$$K = \frac{\log \frac{1}{\sqrt{N}}}{\log \frac{D_c}{D\sqrt{N}}} \quad (1.7)$$

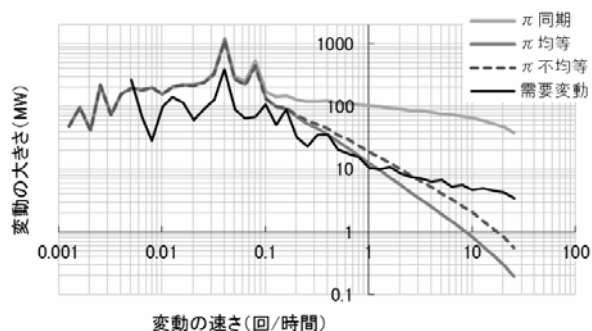


図 1.23 不規則構造のスペクトル

北陸地域に 1540MW の PV がこのような不規則な不均等分布で普及したときの 1/10 デカード・スペクトルを計算すると図 1.23 のようになりました。例によって需要変動との公平な比較のために PV 変動は π 倍してあります。RE の変動量は、数時間周期の遅い変動から数分周期の速い変動の広い領域において、均等分布の場合の約 2 倍になっています。また RE 出力変動が需要変動を下回るのは周期 30 分以下に限られるようになります。

ここでは密集部の RE 間隔を 20m と非常に小さく設定しております。現実的には間隔はもう少し広いでしょうから、不規則分布によって中間から速い変動がこんなに大きくなることはないと思います。不規則分布は面白いテーマゆえ、今後研究が進むと期待されます。

従来法の問題点⁽⁷⁾

帰納法的な従来法に問題がないなら著者として当然従来法を踏襲するわけで、新たに演繹法的な遷移仮説という理論体系を構築する苦労は避けます。両手法の違いが明確になるよう、図 1.24 に比較しました。

従来法には明らかに問題があります。その第一は少数地点の時系列データから「20 分変動幅 $\Delta P_{20}(t)$ の日最大値」という「指標」を切り出し、その指標に演算を加えて大量普及時の指標を推定していることです。指標はどんなに筋の通ったものでも実数が 1 個ですから、情報量は元の時系列データから大幅に少なくなっています。ということは、少なくなった情報量を元に大量普及時を推定しているわけで、そのために推定の精度は劣ります。

これに対して遷移仮説は少数観測データの情報量を落とさずに大量普及時の時系列データ全体を推定し、そこから指標を切り出しているわけで、精度の面で有利です。

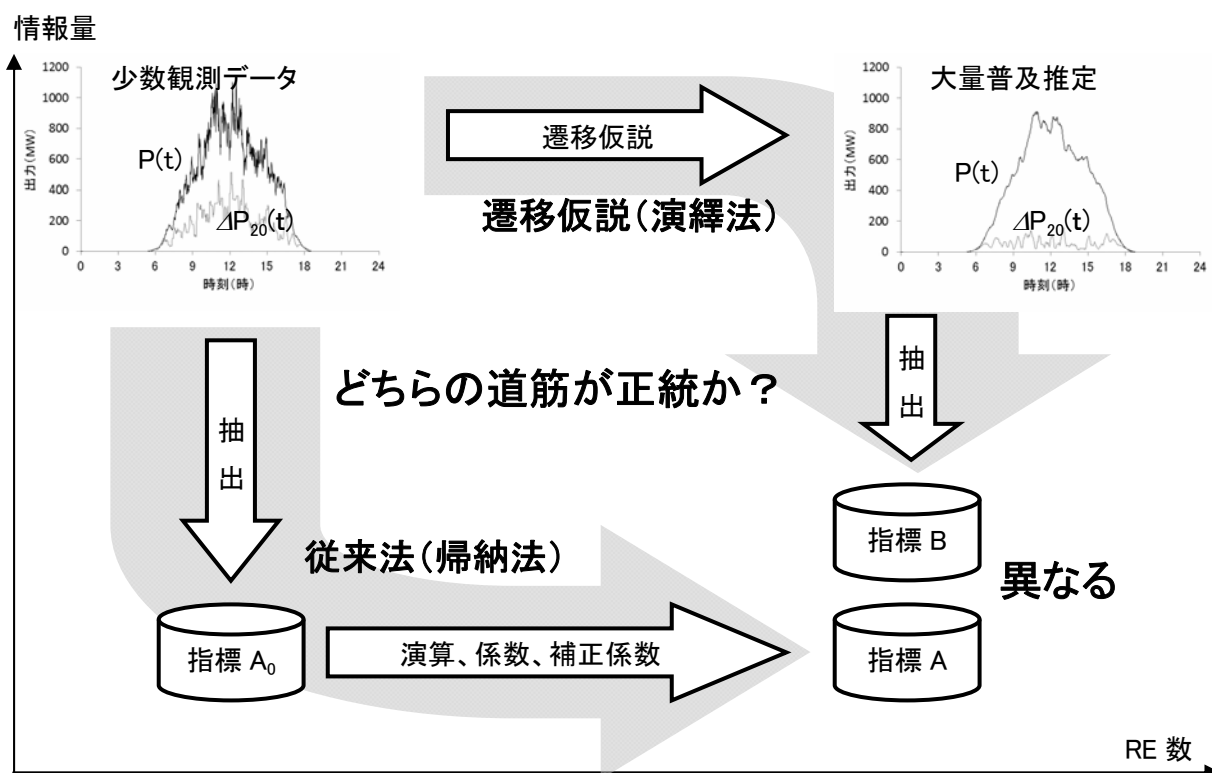


図 1.24 従来法と遷移仮説の違い

推定精度が低くなる事例として不等時性があります。従来法は少数観測地点で 20 分変動幅の最大値 $\Delta P_{20\max}$ が出現する時刻に大量普及時も最大値が出現すると、暗黙のうちに仮定しているのではないのでしょうか。

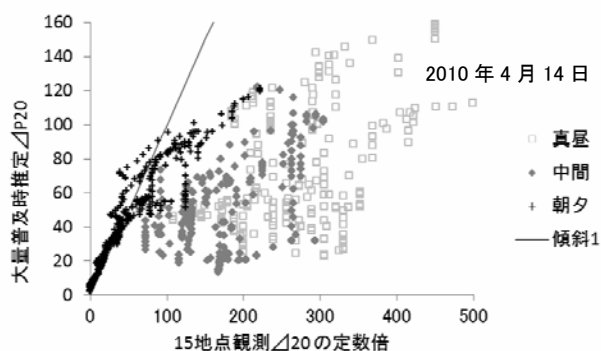


図 1.25 15 地点と大量普及の 20 分変動幅

そこで毎分の 15 地点観測データと大量普及時推定データの 20 分変動幅 $\Delta P_{20}(t)$ を比較してみます。変動が激しかった 1 日の結果を図 1.25 に示します。20 分変動幅が 15 地点で最大となる時刻と大量導入時で最大となる時刻は、明らかに異なります。図中には原点を通る傾斜 1 の直線が引いてあります。均し効果が全く働かなければ、この直線状にプロットされます。朝夕にはその傾向が強いようです。反対に真昼は均し効果が非常によく効いています。結果的に大量普及時には一日を通じて 20 分変動幅が大きく変化しないことが図 1.24 の部分図でもわかると思います。

日射量から出力への換算

以上は日射量の把握・予測です。実用のためには出力に換算する必要があります。職業的研究者の提案は実物のサンプリング調査です。信頼できるデータを得るには無作為抽出で 2000 件ほどを計測する必要がありますが、時間とコストの問題が大きいです。これに対して現場を預かる職人である著者の対案は、電力会社には連系する PV からの毎月の電力購入実績が必ず記録されているから、これと観測日射量から換算係数を算出するというもので、既存のデータの流用ゆえ、時間とコストの両面が節約できます。著者の対案に賛同する電力会社もあります。他方、サンプリング調査は未だ開始されていないようです。

蓄電池 LFC^{(5),(6)}

系統周波数の維持のためには調整に用いる電源の出力を調整します。これを海外では Regulation と呼んでおり、数分周期以下の速い調整です。また調整電源の出力が上下限に張り付くと調整できなくなるので、上下限に張り付かないよう、需要や RE 出力変動に追従して電源全体の出力を調整します。これを海外では Load Following と呼んでおり、数分周期以上のやや遅い調整です。もっと遅くて雄大な変動は需要見込み外れなどの要素も入り、海外では Reserve と呼んでいます。マイナスの Reserve（予備力）のことを特に「下げ代」と呼ぶことがあります。速い調整から順に Regulation, Load Following, Reserve に分類する海外の方法は当を得ていると思います。わが国では Load Following の位置づけが今一つ明確でないような気がします。

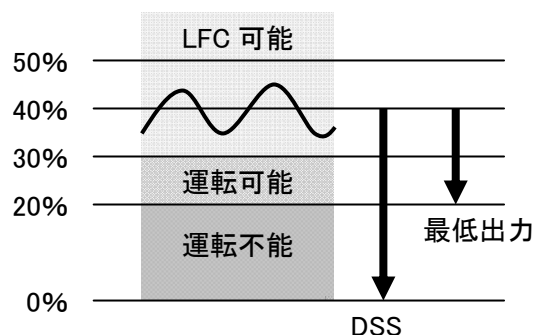


図 1.26 火力発電の運転可能範囲

将来、何がしかの蓄電池が導入されることは大いにありえます。蓄電池を単に下げ代として使うのではなく、調整力として使えば効率的です。火力の運転可能範囲は図 1.26 のようなもので、±5%ほどの LFC を運転するために平均して定格の 40%以上の出力を出さねばなりません。もし調整運転の必要がないのなら火力を 20%ほどの最低出力まで下げるか、または止めることができ、20～40%の出力減少分はそのまま下げ代の拡大に回せます。

これに加え、下げ代の最終的切り札は原子力の発電抑制だと著者は考えております。燃料棒の安全という制約から出力変化速度に制限はありますが、技術的に可能であり、海外では行われており、我が国でも実例があります。燃料費が格安なため最大出力運転を志向してきた原子力ですが、水力に加えて風力や太陽光が大量に普及すると、これらは燃料費が安いどころかゼロの電源ですから、燃料費が安いという理由で原子力は最大出力運転するだけの根拠がなくなってきます。

下げ代の確保には RE の出力抑制という手段もあります。考えてみれば、昔の風車や水車は、

使わないときには自然の恵みのエネルギーを棄てていたわけです。ただ、小規模で多数の RE を制御するコストを考えると、効率的ではないような気がします。

Reserve 問題がなくなれば、あとは Load Following と Regulation 問題です。これらは時間的に短い問題なので、対策に蓄電池を用いても経済的に困難とはなりにくい。つまり蓄電池は瞬発力（電力容量）には優れるが持久力（電力量）が安くないという性質があるので、時間的に短い問題になれば経済的に成立しうる選択肢たりえるのではないかと思います。

これととも、小規模な地方電力 1 社では苦しいこともあるでしょうが、東日本 50Hz 系統、西日本 60Hz 系統という 1 億 kW 規模の系統になれば、需要変動の均し効果、RE 出力変動の均し効果が存分に発揮され、蓄電池の出番は、実はないのではないかと著者は見えています。こういう事情ですが、それでも蓄電池 LFC が必要ならばどうすればよいか、一応考えておいても大きな無駄ではないと考えます。

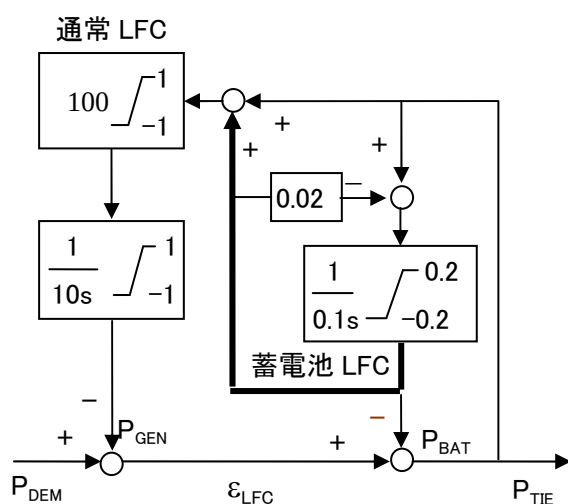


図 1.31 通常 LFC と蓄電池 LFC の相互補完制御

蓄電池 LFC は通常の LFC よりはるかに高速ゆえ、LFC 負担は蓄電池に偏りがちになります。できれば蓄電池は通常の LFC の制御残を吸収するものであってほしいところです。その方が通常 LFC が怠けず、従って LFC 蓄電池の容量が少なくて済みます。これを実現する方法として図 1.31 の制御があります。連系線潮流 P_{TIE} と蓄電池出力 P_{BAT} の和を通常 LFC の目的変数として与えます。その結果、通常の LFC はあたかも蓄電池がないように動作します。蓄電池 LFC には連系線潮流を与えます。

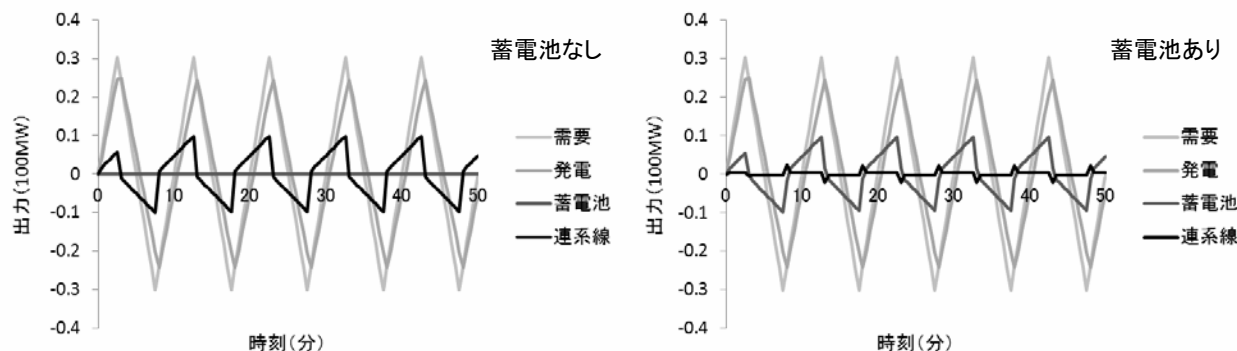


図 1.32 通常 LFC と蓄電池 LFC の相互補完の検証

この制御の効果を検証するため簡単なシミュレーションを行ってみます。連続三角波を需要変動として与えます。結果を図 1.32 に示します。蓄電池 LFC を導入しても通常 LFC で制御されている発電機の出力は変わりません。蓄電池 LFC なしの際の連系線潮流がほぼ蓄電池 LFC の出力になり、これにより連系線潮流変動は非常に小さく抑えられています。また、通常の LFC の効果と蓄電池 LFC の効果を識別できます。

蓄電池 LFC は実在する電力系統で役に立つでしょうか？この疑問に答えるため簡単なシミュレーションを行ってみました。可変電源は 1 機で代表しております。現実の各機の変化速度は少なくとも現在出力の 4%/分はあるので、代表 1 機でも 4%/分としました。LFC は簡単のため外部系統が圧倒的に大きいと仮定して FTC (Flat Tie-Line Control, 定連系線潮流。連系線潮流を目標値に維持する) 制御としております。制御残差は LFC 制御ループ一巡の「むだ時間」が大きいほど増大します。ここでは「むだ時間」を 0.5 分と設定したところ、現実の系統とほぼ等しい最大で±40MW 弱の制御残差になりました。これでシミュレーションの準備は整いました。

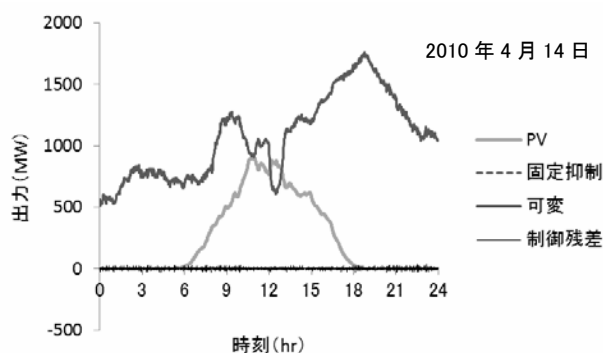


図 1.33 RE 変動が大きい日の電源出力

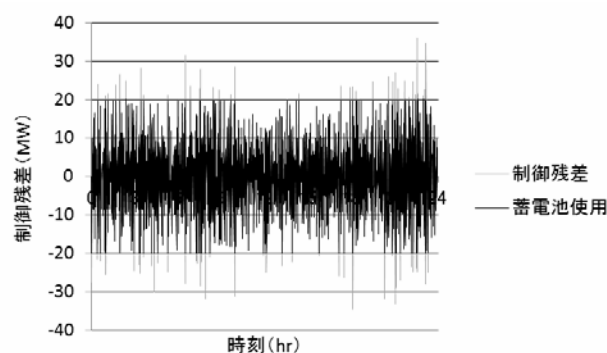


図 1.34 RE 変動が大きい日の制御残差

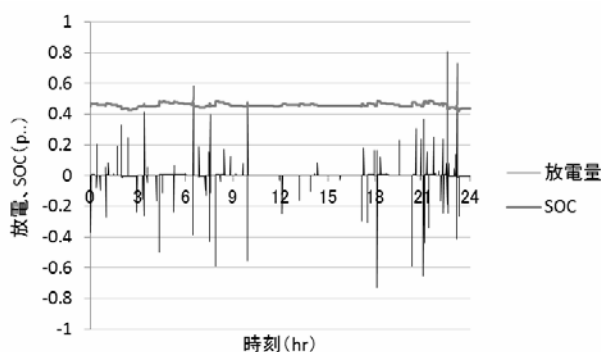


図 1.35 RE 変動が大きい日の蓄電池状況

では、RE の速い出力変動で電力系統が周波数調整にどの程度困るか、蓄電池 LFC がどう役立つか、試算した結果を紹介します。図 1.33 から 1.35 は、今までに何度も登場した日射量変動が激しかった 2010 年 4 月 14 日に PV が大量普及していたと仮定します。可変電源は下限の 385MW まではまだ余裕があります。従って特に大きな制御残差が生じることはありません。それでも蓄電池があれば可変電源の出力調整の遅さを補って、制御残差を縮小することができます。でもこれは過剰品質かもしれません。

むしろ蓄電池 LFC が役に立ったのは晴の日です。PV の出力変動は大きくありませんが、発電量が大きいので、電力余剰が生じかねず、固定電源の一部を抑制しています。当然、可変電源は最低出力近くで運転しており、出力変化速度が低下しています。従って急激な需要あるいは PV

出力の変動があると追従しきれなくなるおそれがあります。

2010年5月15日にPVが大量普及していたと仮定します。可変電源は、需給バランス上、火力1台を停止したため下限は210MWに減少しています。計算結果を図1.36から1.38に示します。いわゆる「下げ代」が不足するので時間帯により固定電源を最大200MW抑制しているのですが、それでも可変電源出力は224MWまで低下し、いわゆる「底打ち」状態になっています。中でも昼休みに入る12時頃、需要が急減するのに可変電源が「底打ち」状態になっているため、制御残差が負の方向（電力余剰側）に-60MWにまで大きく振れております。この残差は蓄電池LFCの併用により-40MWにまで緩和されています。これは蓄電池の容量を±20MWに設定しているため、20MWを超える緩和ができません。1日の充放電回数は数十回で、リチウムイオン電池にとって特に厳しい回数ではありません。これは不感帯を適切に設定しているからです。蓄電池のSOC（State of Charge、充電深さ）は大きな充電を開始する昼休み最高で0.8にまで上昇していますが、満充電にまではまだ余裕があり、これもリチウムイオン電池にとって特に厳しい充電状況ではありません。

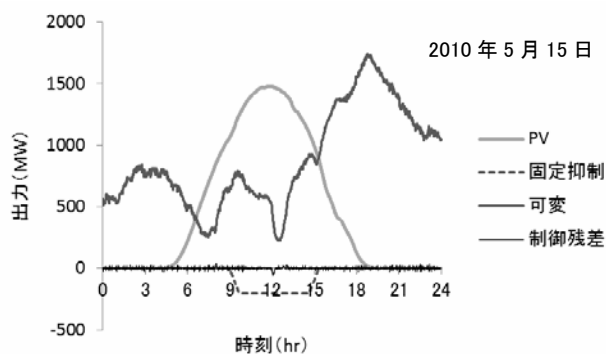


図 1.36 晴天日の電源出力

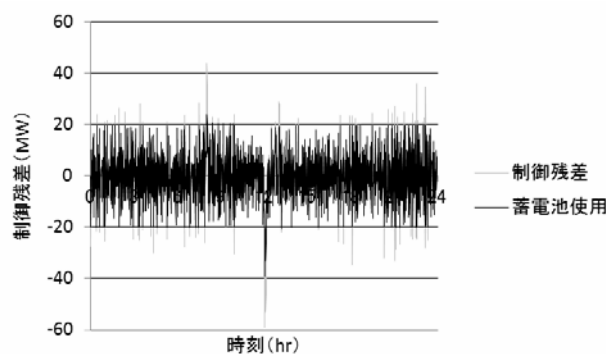


図 1.37 晴天日の制御残差

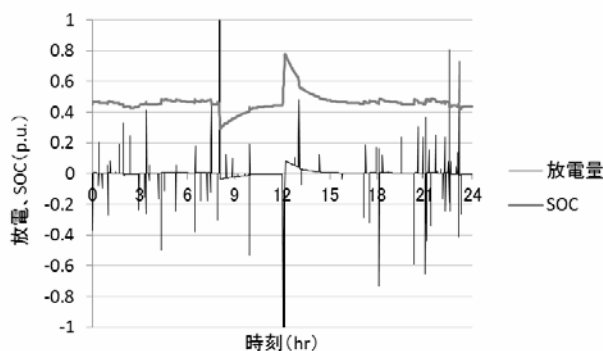


図 1.38 晴天日の蓄電池状況

調査の結果、調整力が調整電源出力の4%/分は確実にあるので、REの速い変動が連系線潮流に悪影響することは、考えにくいようです。蓄電池LFCの活用は補助的なものになります。スマートグリッドの内容の一つに新型蓄電池の利用も含まれておりますが、その必要性については冷静に考えてみる必要があると思います。

REの出力予測

REの速い出力変動が系統の周波数調整（Regulation）に与える悪影響は、どうやら深刻なものではなさそうです。むしろ遅い変動も含めて系統の需給調整（Reserve）に与える影響の方が深刻

に見え、何か対策が必要に思えます。その切り札と目されるのが RE の出力予測です。これは気象予測データ（10 分刻みで提供されています）などを元に、数時間から数日先の RE の出力を予測しようとするものです。出力予測は 2012 年現在、研究が始まったばかりで、まだ進行中という段階なので、ここで詳しく述べることはできませんが、一応感触はつかんでいるので、概要だけ簡単に述べておきます。

ざっくり言って、1 電力会社の寸法の地域全体での翌日予測の誤差は、PV の場合、標準偏差 σ で定格出力の 5~10%です。これは「学習」などの手法も総動員した、現在考えられる最善の予測です。系統運用者としては 95%信頼度ということで普通は 2σ を見込にますから、覚悟すべき予測誤差は 10~20%で、154 万 kW の 20%は 31 万 kW になり、小さめの火力 1 台分の電力です。

とはいえ、晴天の日、雨天の日の予測誤差は大きくなく、晴と曇が交代する日、つまり変動の大きい日に誤差が大きくなることもわかっていますから、何かうまい手があるかもしれません。期待しましょう。

ここで予測誤差と言いましたが、誤差を算出するには真値が必要です。出力把握が真値を与えてくれるはずですが、未完成なので、ざっくり言った誤差も仮の値です。気象予測は 10 分刻みなので、これを元にする出力予測も 10 分刻みで得られます。ところが今までの出力把握は、短周期変動幅のような指標で表現されていて、10 分刻みの時系列データとして把握値を与えるものではありませんでした。出力予測法では過去の気象データ実績から相関法により RE 出力把握する方法もありますが、やはり日射量そのものを観測したデータで一度は校正しておく必要があるでしょう。そういう意味で遷移仮説法は、日射量観測データから時系列データとして出力把握が可能な方法であり、有意義と考えます。

風力発電出力のランプ変動

風力は PV と少し様相が違い、「周期的変動」よりも、前線の通過など、遅くて雄大な「ランプ変動」が問題だとされているようです。ランプ変動の分析の前に、PV と同じく、風力の周期的変動を一応分析しておきます。

【周期的変動】 例題として風力 3 サイト（南西から順に A, B, C）をとりあげます。これらは南西から北東方向に約 70km 間隔で並び、定格出力は南西側から順に 1.8MW, 1.5MW, 3.0MW です。2007 年 1 月の 1/10 デカード・スペクトルを図 1.39 に示します。各サイト単独のスペクトルは、ほぼ平坦ですが、速い変動がやや小さくなっています。

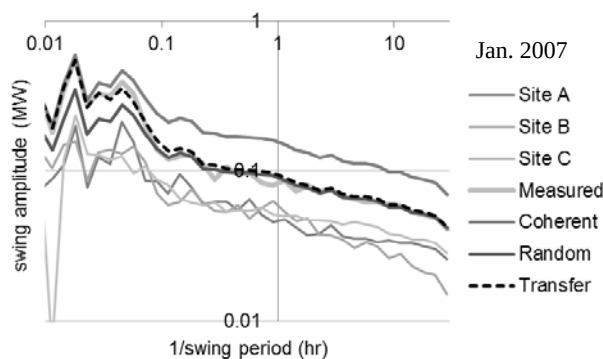


図 1.39 風力 3 サイトのスペクトル

3 サイトの変動速さ f における変動振幅 $\Delta P_A(f)$, $\Delta P_B(f)$, $\Delta P_C(f)$ から、同期仮説の変動振幅

$\Delta P_{\text{coh}}(f)$ とランダム仮説の変動振幅 $\Delta P_{\text{ran}}(f)$ を次のように算出します。

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{coh}}(f) &= \Delta P_A(f) + \Delta P_B(f) + \Delta P_C(f) \\ \Delta P_{\text{ran}}^2(f) &= \Delta P_A^2(f) + \Delta P_B^2(f) + \Delta P_C^2(f)\end{aligned}$$

各サイトの定格出力が異なるので、遷移仮説の適用は次のように行います。均し効果は、定格出力がサイトによって違うため若干弱まり、サイト数 $N = 3$ に代えて、次のように算出される「等価サイト数： N_{eq} 」を用います。ここに W_A , W_B , W_C は各サイトの定格出力です。結果的に、サイトにより定格出力が異なるため、均し効果は3サイトではなく、少し減じられて2.74サイト相当になります。

$$\frac{1}{\sqrt{N_{\text{eq}}}} = \frac{\sqrt{W_A^2 + W_B^2 + W_C^2}}{W_A + W_B + W_C} = 0.604218 = \frac{1}{\sqrt{2.73913}}$$

遷移仮説は、 N_{eq} を用いて、次のように表現できます。

$$\Delta P_{\text{tra}}(f) = \Delta P_{\text{coh}}(f) \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{N_{\text{eq}}}}{1 + j T_x f} \right|$$

ここに T_x は遷移周期であり、観測値 $\Delta P_{\text{mea}}(f)$ と遷移仮説 $\Delta P_{\text{tra}}(f)$ の対数二乗誤差合計が最少となるように同定します。本例では $T_x = 29.7 \text{ hr}$ でした。PV 変動の遷移周期が8時間程度だったのと比べると、随分長い遷移周期です。

遷移仮説を応用すれば、北陸地域に定格出力 1000MW の風力が一様に分布した場合のスペクトル $\Delta P_{\text{high}}(f)$ を次のように推定できます。なお上記3サイトの定格出力のばらつきは 1000MW 導入時も踏襲されるものとします。

$$\Delta P_{\text{high}}(f) = \Delta P_{\text{mea}}(f) \frac{1000\text{MW}}{6.3\text{MW}} \left| \frac{1 + j T_x f / \sqrt{M_{\text{eq}}}}{1 + j T_x f / \sqrt{N_{\text{eq}}}} \right|$$

ここに M_{eq} は 1000MW 導入時の等価サイト数で、次のように算出されます。

$$M_{\text{eq}} = N_{\text{eq}} (6.3\text{MW} / 1000\text{MW})$$

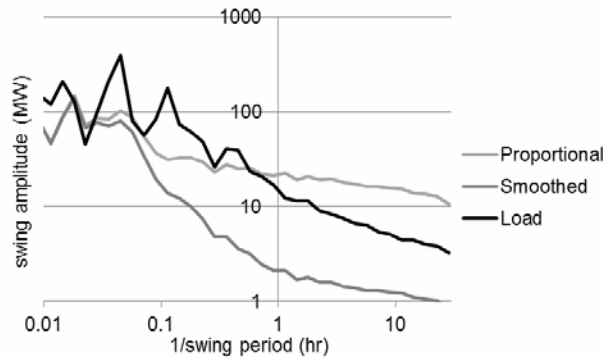


図 1.40 風力 1000MW 導入時のスペクトル

1000MW 導入でサイト数が増えたことによる均し効果の増大を考慮して求めたスペクトル $\Delta P_{\text{high}}(f)$ を図 1.40 に示します (Smoothed)。あわせて、均し効果の増大を考慮しないスペクトル

(Proportional) と、需要変動スペクトル (Load) も示します。周期 1 時間以下の LFC 領域では、均し効果の増大を考慮した周期的変動は需要変動より随分小さくなっておりまゝです。しかしこの結果は風力発電の分布が一様である場合であり、特定エリアが風力適地となっている現実から均し効果はもっと小さくなると推定でき、1000MW 導入時は、均し効果の増大を考慮・無視の間になります。しかしそれでも需要変動スペクトルを上回ることにはないと思われます。それゆえ、風力ではランプ変動が問題であるとする世評は妥当であると著者も同意します。

【ランプ変動の定義】 標準的な定義は確立しておりません。本稿では図 1.41 の定義を採用します。間隔 T_w で幅 $T_w/2$ の 2 つの窓内の平均値の増減をランプ変動と定義します。2 つの窓を単位時間 (例えば 1 分) 刻みで平行移動しながらデータを蓄積します。この方法は処理によってデータ数がほとんど減少しないという美点があり、後に確率密度曲線を描く際に良い結果を与えます。同一データに、世界各国 (ドイツ、英国、米国、日本) で行われているランプ変動の定義、および本稿の定義を適用して確率密度曲線を求めた結果を、図 1.42 に紹介します⁽¹⁾。データは周期的変動で用いた風力 3 サイトの 2006 年 9 月～2007 年 2 月の連続データを用いました。

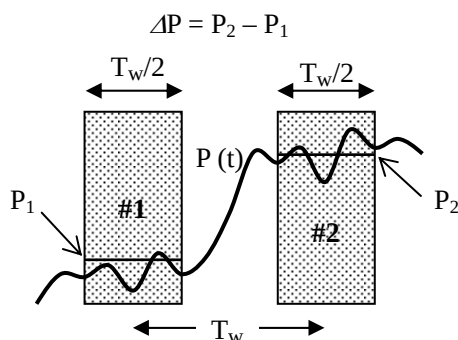


図 1.41 窓間隔とランプ増減量の定義

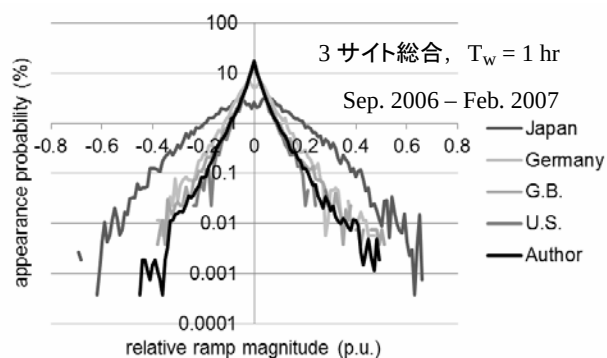


図 1.42 ランプ変動の定義による相違

この確率密度曲線は、形が傘を広げ（すばめ）たように見えることから、アンブレラ・カーブと呼ばれることがあります。一見して分かるように、日本の事例だけが異質で、ドイツ、英国、米国、著者の定義は、ほぼ同じ結果を与えています。なかでも、著者提案の定義は非常に大きな変動・小さな確率に至るまで、線が連続かつ滑らかになっております。これは、リスク管理面から必要になる、希頻度・大規模ランプ変動を扱う際に好都合な性質です。この美点はデータ処理によりデータ数がほとんど減少しないことに由来しています。

【窓間隔 T_w による均し効果の違い】 窓間隔 T_w が 10 時間の場合と 1 時間の場合を図 1.43 に比較して示します。窓間隔 10 時間の場合は 3 サイトおよび合計の曲線がほぼ重なり合っています。

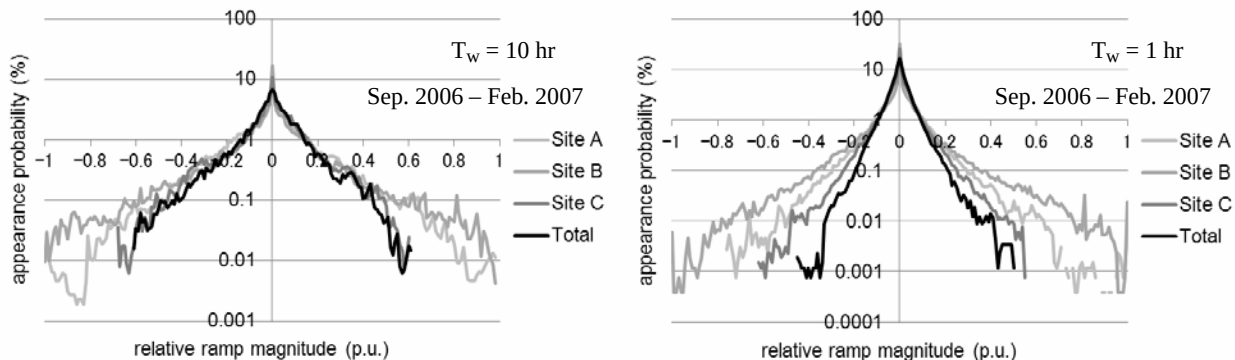


図 1.43 窓間隔による確率密度曲線の相違（風力 3 サイト、合計）

これはランプ変動に「均し効果」があまり働いていないことを意味しています。逆に窓間隔 1 時間の場合は、3 サイトに比べて合計の曲線が狭まって（傘がすぼまって）おり、大変動が出現する確率が小さくなっており、「均し効果」が働いていることが分かります。

【2 σ , 3 σ ランプ変動幅】 速いランプ変動に均し効果が働くことを定量的に評価する方法として「2 σ または 3 σ ランプ変動幅」を提案します。まず、確率密度曲線において変動幅絶対値（増・減双方）に対する累積確率密度曲線を描くと図 1.44 のようになります。これは T_w が 1 時間の例です。窓間隔ごとに、2 σ （確率95.44%）または 3 σ （確率 99.74%）で、これ以上の大きなランプが生じないという変動幅を算出できます。本稿では増・減双方向で算出していますが、増・減を個別に計算することももちろん可能です。この「2 σ または 3 σ ランプ変動幅」は窓間隔 T_w で変化し、各 3 サイト、合計（Measured）、同期仮説（Coherent）、ランダム仮説（Random）の、窓間隔による 2 σ または 3 σ ランプ変動幅 が算出されます。結果を図 1.45 に示します。

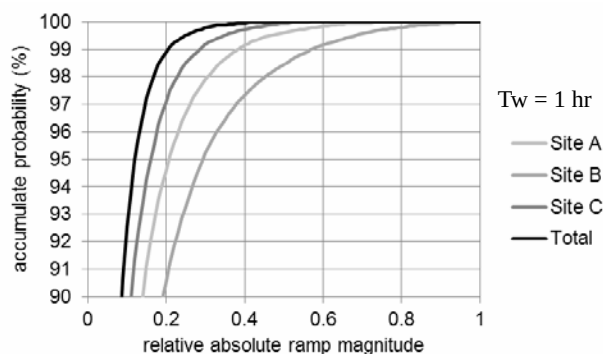


図 1.44 累積確率密度曲線

そこへ遷移仮説を適用しますが、ランプ変動に対して遷移仮説を適用する際には、次のように、ある定数 K を導入します。これは、ランプ変動は遅い同期変動であっても、弱い均し効果が見られるからです。

$$\Delta P_{\text{tra}}(f) = K \Delta P_{\text{coh}}(f) \left| \frac{1 + j T_{\text{wx}} f / \sqrt{N_{\text{eq}}}}{1 + j T_{\text{wx}} f} \right|$$

遷移仮説で算出された理論値（Transfer）は観測値（Measured）との累計二乗対数誤差を最少とするよう求めたパラメータは、

2 σ の場合： $T_{\text{wx}} = 8.74\text{hr}$, $K = 0.921$ 3 σ の場合： $T_{\text{wx}} = 2.74$ 時間, $K = 0.786$
 となりました。遷移仮説（Transfer）と観測値（Measured）はよく一致しています。

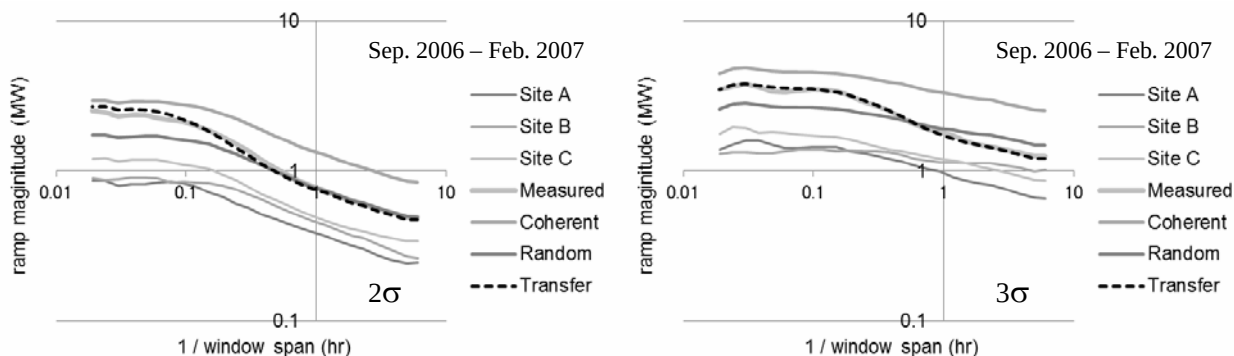


図 1.45 風力 3 サイトの窓間隔によるランプ変動幅の変化

2 σ と 3 σ を比較すると、3 σ において T_{wx} が非常に小さく、従って、均し効果が働きにくくなっています。つまりこの結果は、頻繁な中程度のランプ変動よりも稀な大きなランプ変動が問題になることを示しています。

遷移仮説により、北陸地域に定格出力 1000MW の風力が連系したときのランプ変動を推定して

みます。最も問題となる 3σ の場合を計算すると、図 1.46 のようになりました。

方法は周期的変動の場合と同じです。あわせて需要の 3σ ランプ変動も示します。1000MW 程度の導入量では、風力のランプ変動は需要のそれをかなり下回ることがわかります。

但し、安心はできません。本稿では風力サイトが地域に偏りなく分布することを前提としています。現実的には特定地域に適地が偏

っているため集中立地することになり、均し効果が働く変動速さはもっと速い側へシフトするでしょう。また、需要のランプ変動は精度よく予測できるのに対し、風力の予測は発展途上の技術です。需要の翌日予測誤差は 2% 程度です。風力の翌日予測誤差が 10% 程度とすると、図の結果から、1 時間以上の窓間隔のランプ変動では、風力予測誤差の方が大きくなってしまいそうです。以上のことから、今後の最大の課題は、風力ランプ変動の予測精度の向上となります。その認識は既に全国大で共有されているように思えますが、なぜそれが最大の課題なのかという理由が判然としませんでした。本稿の分析でその認識が正鵠を得ていることが立証できたと思います。

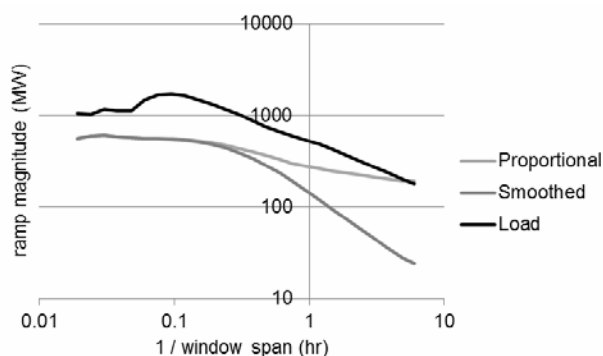


図 1.46 風力 1000MW 連系時の 3σ ランプ変動

文献

- (1) 山岸，上田，金尾，駒見：「複数サイト間での風力発電出力変動に関する一考察」，電気学会論文誌 B，129 巻 6 号，2009
- (2) 名古屋，山岸，金尾，駒見：「相互平滑化を考慮した太陽光発電大量導入時の短周期出力変動の一予測法」，電気学会電力技術研究会資料，PE-10-88，2010
- (3) 名古屋，駒見，荻本：「相互平滑化効果を考慮した太陽光発電大量導入時の出力変動想定の一手法」，電気学会論文誌 C，131 巻 10 号，pp.1688-1696，2011
- (4) 山岸，名古屋，駒見，藤井：「地域偏在による平滑化効果の低減を考慮した太陽光発電出力変動推定手法」，電気学会論文誌 C，131 巻 10 号，pp.1722-1729，2011
- (5) 名古屋，駒見：「PV 大量導入系統における蓄電池を用いた LFC 方式の基礎的検討」，平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No. 135，2011
- (6) 名古屋，駒見，荻本：「太陽光発電が大量導入された電力系統における蓄電池を用いた負荷周波数制御の一方式」，電気学会論文誌 B，132 巻 4 号，pp. 325-333，2012
- (7) 名古屋，駒見，荻本：「PV 大量導入時の出力変動指標の算出に関する一考察」，平成 24 年電気学会全国大会，No. 6-010，2012
- (8) 名古屋，駒見，荻本：「複数地点における日射量変動特性の季節別分析」，平成 25 年電学全大，No. 6-125，2013
- (9) 名古屋，駒見，荻本，岩船：「変動の激しい日に関する複数地点の日射量変動特性分析」，平成 25 年電学電力・エネ部門大，No. 257，2013