

# 電力不足発生リスク回避のための節電率設定方法への一提言

## — 電力供給量逼迫環境下での電力不足発生確率評価システム —

有蘭 育生<sup>1\*</sup>、竹本 康彦<sup>2</sup>

現状において、再生可能エネルギーの利用を含めた電力供給量の確保および節電対策に関するシステム策定は緊急を要する。ただし、天候等の影響により、電力需要量や再生可能エネルギーによる電力供給量は変動する。また、火力発電システム等による電力供給量も設備故障等の要因からやはり確定値とはいえない。よって、電力の需要・供給量に関する不確定な予測のもとで電力不足を回避するための計画策定が必要である。この研究では、電力需給バランスのもとでリスク回避を目的とした電力不足発生確率評価システムを提案し、現状の電力不足リスクの水準を維持しつつ、電力不足を回避するための節電率の一設定方法について提案する。

**キーワード:** 電力需給バランス、電力不足発生確率評価システム、Chebychev の確率不等式、Bennett の確率不等式、Hoeffding の確率不等式

### A proposal for setting electric power saving rate to avoid risk of electric power shortage occurrence

– Probability evaluation system of electric power shortage occurrence under tight electric power supply –

Ikuo ARIZONO<sup>1\*</sup> and Yasuhiko TAKEMOTO<sup>2</sup>

Japan has to urgently build a new system for securing electric power supply including renewable energy and for saving electric power. The electricity demand and the electricity supply based on renewable energy are influenced by the weather. Thermal power generation may also be affected by equipment failure. Therefore, plotting of a plan is required to avoid electric power shortage under inaccurate prediction for supply and demand of electricity. In this article, we propose a probability evaluation system to avoid electricity shortage. We also propose a method for setting the electricity saving rate to avoid electricity shortage while maintaining the present level of electricity shortage occurrence risk.

**Keywords:** Electric power demand-and-supply balance, electric power shortage probability evaluation system, Chebychev probability inequality, Bennett probability inequality, Hoeffding probability inequality

#### 1 はじめに

原子力発電所の新規建設および点検停止中の原子力発電所の再稼働などに関する見通しが不鮮明である現状を勘案すれば、既存遊休発電システムや再生可能エネルギーの利用を含めた電力供給量の確保および節電対策に関する計画法やシステム策定は緊急を要する<sup>[1][2]</sup>。2011年夏季からの、特に東京電力エリアおよび関西電力エリアにおける「でんき予報」は、翌日あるいは当日の電力消費ピーク時における電力供給量と予想最大電力需要量との比率に応じた電力需給バランス情報の提供に関するその一つの実践例といえる。「でんき予報」では、ピーク時電力供給量と予想最大電力需要量は、電力会社に蓄積されたデー

タ、および過去の経験に基づき与えられているものと想われる。

2011年秋の関西電力のホームページには、節電意識の啓蒙のために、気温に対するピーク電力需要量の回帰モデルが掲載されていた。ここでは、気温と2010年度と2011年度の夏の最大電力需要量の関係が図示されていた。その図からは、明らかに2011年度と2010年度の電力消費行動の変化がみてとれた。また、回帰モデルにおいて与えられる平均的な電力需要量のまわりに実際の電力需要量はばらつく様子もみることができた。このことから、電力需給システムにおいて、例えば天候と電力需要量の関係に関しては、過去の情報蓄積により、電力需要量の子

1 岡山大学大学院 自然科学研究科 〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1, 2 県立広島大学 経営情報学部 〒734-8558 広島市南区宇品東1-1-71

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan  
\* E-mail: arizono@et6500.mech.okayama-u.ac.jp, 2. Faculty of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima 1-1-71 Ujina-higashi, Minami-ku, Hiroshima 734-8558, Japan

Original manuscript received June 15, 2012, Revisions received February 20, 2013, Accepted February 26, 2013

測分布に比較的多くの知見が存在すると思われる。しかし、電力供給力の現状に対する電力消費行動の変化を踏まえれば、例えば電力需要量の分布形を正確に把握できるかという点、必ずしもその限りではないことを示している。

ところで、震災後の研究報告として、東日本大震災による電力不足が日本経済に与える影響に関する考察が公表されている<sup>3)</sup>。これによると、昨夏の供給電力逼迫状況における一時的な節電は生産や雇用にはさほど影響を及ぼさなかったと述べられている。また、節電の長期化により雇用が悪化するものの、自発的な節電よりも、強制的な電力供給削減の方が生産と雇用を大きく減少させることが明らかになったと述べられている。このことは、適切な節電目標を提示することの必要性を示唆している。

ところで、関西電力エリアでは、2011年夏、一律15%の節電要請が関西電力により発表された。この節電要請率は、おそらく、前述のような過去のデータの蓄積ならびに電力消費者の電力消費行動の変化の予測のもとに決定されたものと思われる。ただし、その関西電力に対し、当時の橋下大阪府知事が節電要請率15%の根拠を示すよう要求したところ、関西電力は、明確な回答を行わず、沈黙し、うやむやのまま、結局節電要請率15%が名目上残ったまま、2011年の夏をなんとか乗り切ってきた。これに対し、関西電力による必要節電率15%の根拠が必ずしも説明可能な科学的根拠にのっとるものでなかった可能性と、あるいは意図的な情報操作としての15%という数値であった可能性さえもいわれた。このことは、関西電力のみならず、東京電力をはじめとする電力各社の情報公開の不十分さをうかがい知るものといえる。もちろん、現在のような状況において、社会的に大きな混乱を引き起こさないように各個人が行動することは大切である。ただし、各個人あるいは各種団体がとるべき行動の指針として、何らかの納得がいく情報の提供があってこそのことである。

一方、脱炭素エネルギーの一つの帰結として、再生可能エネルギーに基づく発電システムが取り上げられ、再生可能エネルギー特別措置法のもとに再生可能エネルギーに基づく発電量の買取価格が決定された。ただし、再生可能エネルギーとは、端的にいって自然界に存在するエネルギーのことであり、それゆえ、例えば太陽光発電の場合、発電量は天候に左右され、風力発電の場合は、風量等の気象条件に依存するなど、自然界に存在するエネルギーを電力エネルギーに変換するにあたり、その発電量、すなわち電力供給量には不確定要素が多く存在する。また逆に、例えばエアコンの利用等に代表される電力需要量もまた天候等の気象条件に大きく影響されることはいうまでもない。このため、電力需要量に関しても不確定要素が存在

する。また、火力発電等に代表される既存の発電システムによる電力供給量も設備故障等の要件を勘案すれば、微妙といえどもその変動を考慮する必要がある。また、既存設備の経年疲労を考慮すれば、今後より厳格な点検計画が施行されるようになり、この結果が電力供給量に変動を与えるものと予測される。よって、我が国の置かれた現状に照らして、これら電力の需要-供給量に関する不確定要素を含む予測量のもとで、電力不足の発生を回避するための発電設備の拡充や省電力に向けての計画策定の必要性はいうまでもない。さらに、電力エネルギーの需給バランスを予測し、場合によれば、この予測に基づき、適正に節電の呼びかけを行う等の措置を図るためのシステム作りは急務である。

そこで、この研究では上記の状況を勘案し、現在の電力需給バランスが逼迫した環境において、電力需要量および電力供給量に確率的変動をとる場合の電力不足発生確率を評価することを考える。ただし、電力各社には、おそらく、過去の電力需要量等に関する膨大なデータの蓄積があるとと思われるが、上記のように電力消費行動に変化が見られる現在、蓄積された膨大なデータによっても、翌日あるいは当日の電力消費ピーク時における予想最大電力需要量の確率分布を正確に把握することは容易ではない。また、将来的に期待される再生可能エネルギーに基づく電力供給量はエネルギー変換効率を含め、まだ安定した状態とはいえない。

よってこの研究では、電力供給量ならびに電力需要量の分布が精確には与えられておらず、それらの予測値としての平均と分散といった限定された情報しか利用できない状況を想定することを基本とする。このような条件のもとで、この研究では電力需給バランスが逼迫した環境において、電力不足の発生予測を安全に評価することを目的とした電力不足発生確率評価システムの構築をまず試みる。

ここに、このような電力供給量ならびに電力需要量に関しては、東京電力や関西電力の電力予報のホームページや既述の関西電力ホームページにおける回帰モデルからもうかがい知られるように、少なくとも電力会社には、翌日気温に対する電力供給量や電力需要量の平均や分散を予測するに足る一定量のデータの蓄積があるものと考えられる。現にその一端として、でんき予報はこれらの平均値的な情報に基づいていることはいうまでもなからう。よって、この研究ではこのような背景から、翌日気温、天候の予測に基づき、翌日電力供給量ならびにピーク電力需要量の平均や分散は利用できるが、電力消費行動の意識変化や再生可能エネルギーに基づく発電等の状況変化により、それらの分布形を規定するに至らない状況にあるという立場

に立った上で、翌日ピーク電力消費時間帯における電力供給バランス評価用のシステム構築を目的とする。

さらに、提案する電力不足発生確率評価システムの実際の応用として、これによる評価値をベースに、現状における電力不足リスクの水準を維持しつつ、電力不足を回避するための節電率の一設定方法ならびにその説明責任への寄与について提案する。

## 2 問題の記述

この研究では、これまでの火力発電等による既存設備による発電量に、再生可能エネルギーを源とする発電量を加えて、全発電量が与えられる場合を想定する。ここで、再生可能エネルギーを源とする発電量の全発電量に占める割合は現状において3%程度であり、2020年の達成目標は10%である。

既述の通り、火力発電等に代表される既存の発電システムによる電力供給量も設備故障や点検保守等の要件を勘案すれば、変動を考慮するのが適当であろう。また、再生可能エネルギーによる発電量は天候・気候条件に左右され、現状において必ずしも安定した電力供給をもたらすとは限らない。よって、天候・気候条件による発電量の分布に関するデータの蓄積もこれからであるため、再生可能エネルギーによる電力供給量の分布形は未知であるとするのが現状において妥当である。

同様に、既述のように、現状を勘案した消費者の自発的節電行動により、現在の電力消費行動はこれまでの電力消費行動から確実に変化しており、これより、やはり電力需要量の分布形も未知とする。ただし、例えば翌日の気象条件の予報に基づき、翌日の電力需要量ならびに電力供給量に関する予測値として、おのおのの平均と分散といった情報が利用できるものとする。この研究では、電力需要量や電力供給量に関するこのような限定的な情報に基づき、電力需給バランスにおける電力不足発生確率の安全的な評価を目的とした電力不足発生確率評価システムの構築を試みる。

いずれにせよ、この研究では電力需給量に関する確率の変動をとともなう変数として

- 既存発電システムにおける発電量： $e_0$   
(平均  $\mu_0$ 、分散  $\sigma_0^2$ 、分布形未知)
- 再生可能エネルギー源による発電量： $e_1$   
(平均  $\mu_1$ 、分散  $\sigma_1^2$ 、分布形未知)
- 電力需要量： $e_2$   
(平均  $\mu_2$ 、分散  $\sigma_2^2$ 、分布形未知)

を想定する。ただし、 $e_0$ 、 $e_1$ および $e_2$ には独立性を仮定する。この研究の目的は、現状のように電力需給バランスが

逼迫した状況において、電力供給量や需要量の変動に関する平均や分散といった限定的な情報しか利用できない条件のもとでの電力不足発生確率を評価するためのシステムの構築を第一義とする。

上記想定のもとで、 $e_0 + e_1 \geq e_2$  のとき、電力供給量は電力需要量を満足すると定義する。この定義は、電力需給バランスに関する安全余裕 (safety allowance) を  $s$  とすると、 $e_0 + e_1 \geq e_2 + s$ 、あるいは安全係数を  $k_s$  とするのであれば、 $e_0 + e_1 \geq (1 + k_s) e_2$  等と修正されることになるが、簡単のためにここでは、 $e_0 + e_1 \geq e_2$  のとき、電力供給量は電力需要量を満足すると定義する。

この定義のもとで、確率  $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\}$ 、すなわち電力不足が発生する確率を安全サイドに評価するシステムを構築する。ここでいう「安全サイド」とは、実際の電力不足発生確率が、構築するシステムにおいて評価される電力不足発生確率を確実に下回ることを保証することを意味する。すなわち、想定されるシナリオのもとでの最悪の状況における電力不足発生確率を評価するためのシステム構築をこの研究での目的とする。

## 3 確率不等式による方法の提案

分布形に関する情報を必要とせず、確率変数の平均や分散等の限定された情報に基づき、確率変数の和に関する上側確率の上界を評価する手段として確率不等式が存在する。確率不等式の決定問題への応用に関しては、最近、製品需要量の分布形が未知である状況において、許容欠品率を保証する発注点の決定法に関する竹本らの研究<sup>[4]</sup>やトレンド効果を考慮した安全在庫に関する新里・郭の研究<sup>[5]</sup>等がみられる。そこでこの研究では、電力需給バランスが逼迫した現況において、電力不足発生確率  $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\}$  を安全サイドに評価する緊急避難的システムを確率不等式に基づき提案する。確率不等式には、片側 Chebychev の確率不等式<sup>[6]</sup>、Bennett の確率不等式<sup>[7]</sup>さらに Hoeffding の確率不等式<sup>[8]</sup>など、各種のものが存在する。以下では、これら3種類の確率不等式に基づく評価システムを提案する。

### 3.1 Chebychevの確率不等式による方法

$D$  を平均  $\nu$ 、分散  $\delta^2$  の分布形未知の確率変数とし、 $D$  が平均から正の方向に、ある偏差  $k\delta$  以上大きな値として観測される確率を評価することを考える。このとき、片側 Chebychev の確率不等式<sup>[6]</sup>に基づき

$$\Pr\{D > \nu + k\delta\} \leq \frac{1}{1+k^2}$$

の関係を得る。これを利用するとき、 $e_2 - (e_0 + e_1) > 0$  の確率の上界を評価するために、 $D > \nu + k\delta$  の関係を  $e_2 - (e_0 +$

$e_1 > 0$ の関係と等価とすることにより

$$v = \mu_2 - (\mu_0 + \mu_1) \quad (1)$$

$$\delta^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (2)$$

$$k = \frac{(\mu_0 + \mu_1) - \mu_2}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (3)$$

を得る。ここに、計画発電量は想定される電力需要量より当然大きくあるべきなので、 $k > 0$ は自明である。このとき、電力需要量 $e_2$ が電力供給量 $e_0 + e_1$ を上回り、電力不足が発生する確率の上界は、片側Chebychevの確率不等式により

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \frac{\sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}{(\mu_0 + \mu_1 - \mu_2)^2 + \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

として評価される。

### 3.2 Bennettの確率不等式に基づく方法

同様の問題に対して、Bennettの確率不等式<sup>[7]</sup>を利用することを考える。このとき、各確率変数 $e_0, e_1, e_2$ の平均と分散に加え、評価すべき確率が $\Pr\{e_2 - (e_0 + e_1) > 0\}$ であることから、確率変数 $e_0$ と $e_1$ の変動に関してはそれぞれの最小値が、また $e_2$ の変動の最大値が考慮される。このとき

$$B = \max\{(\mu_0 - a_0), (\mu_1 - a_1), (b_2 - \mu_2)\} \quad (5)$$

とする。ここに、 $B$ の設定に関しては、既述のように $e_0, e_1$ の下限值と $e_2$ の上限値を必要とする。これら $a_0, a_1, b_2$ は、本質的には、過去の実績データ<sup>[9]</sup>に基づく電力需要量の最大値として、また最も控えめに見積もられる発電量としてそれぞれ与えられるものである。ただし、このような実績値が正確な値として利用できない場合も存在する。このような場合においては、確率変数の平均と分散に基づき、例えば、3シグマ法あるいは2シグマ法にのっとり、 $a_0 = \mu_0 - 3\sigma_0, a_1 = \mu_1 - 3\sigma_1$ および $b_2 = \mu_2 + 3\sigma_2$ 、あるいは $a_0 = \mu_0 - 2\sigma_0, a_1 = \mu_1 - 2\sigma_1$ および $b_2 = \mu_2 + 2\sigma_2$ とすることが考えられる。

このとき、Chebychevの確率不等式による場合と同様に、Bennettの確率不等式を用いて、電力不足発生確率の上界は

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \exp\left\{-\left(\frac{\delta}{B}\right)^2 h\left(\frac{kB}{\delta}\right)\right\} \quad (6)$$

と与えられる。ただし、ここでも $\delta, k$ は式(2)、(3)の通りであり、また

$$h(u) = (1+u)\ln(1+u) - u$$

と定義される。

### 3.3 Hoeffdingの確率不等式に基づく方法

Hoeffdingの確率不等式<sup>[8]</sup>を利用することを考える。ここで

も、Bennettの確率不等式の場合と同じく、確率変数 $e_0, e_1$ の変動の最小値 $a_0, a_1$ と $e_2$ の変動の最大値 $b_2$ が各確率変数 $e_0, e_1, e_2$ の平均と分散とともに利用される。

以上の所与条件によって、Hoeffdingの確率不等式に基づき電力不足発生確率を評価する場合に、電力不足が発生する確率の上界は

$$\Pr\{e_0 + e_1 < e_2\} \leq \left(1 + \frac{kB}{\delta}\right)^{\left(\frac{\delta^2 + kB\delta}{B + \frac{\delta^2}{3B}}\right)} \left(1 - \frac{k\delta}{3B}\right)^{\left(\frac{3B - k\delta}{B + \frac{\delta^2}{3B}}\right)} \quad (7)$$

として評価される。ただし、ここでも $\delta, k$ および $B$ はそれぞれ式(2)、(3)および(5)の通りである。ちなみに、式(7)の右辺にみられる数値“3”は考察するシステムにおける確率変数の数を意味する。すなわち $e_0, e_1$ と $e_2$ の3つの確率変数に基づき、電力不足確率を評価することに対応している。

## 4 確率変数の上限値あるいは下限値の設定

Chebychevの確率不等式、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式を用いて所期の電力不足発生確率を評価する場合、確率変数の平均と分散を必要とする点はいずれの確率不等式においても共通である。一方、Chebychevの確率不等式に関しては確率変数の平均と分散の情報のみに基づき定義されるに対して、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式では確率変数の範囲に関する情報を利用する形式となっている。

ただしこの研究では、既述のように現状での電力供給量および電力需要量について、平均と分散という限定的な情報しか利用できない状況を取り扱う。これより、ここでは発電量 $e_0, e_1$ および電力需要量 $e_2$ に関して、それぞれの平均と分散の情報のみに基づくものとする。この際、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式においては、2シグマ法あるいは3シグマ法にのっとり、 $e_0, e_1$ の下限値 $a_0, a_1$ および $e_2$ の上限値 $b_2$ をそれぞれ与えることが考えられる。

ここに、定義域として変動の上下限值をもつ確率分布に関して最も不確実性が大きい分布は一様分布である。区間 $[\alpha, \beta]$ を定義域とする一様分布の平均は $(\alpha + \beta)/2$ であり、分散は $(\beta - \alpha)^2/12$ で与えられる。このとき、一様分布の定義域は平均 $\pm \sqrt{3}$ ×標準偏差で与えられる。すなわち、定義域として変動の上下限值をもつ確率変数として $e_0, e_1, e_2$ を捉える場合、その範囲を平均 $\pm 2$ ×標準偏差で想定しておけば十分であると考えられる。これを勘案して、各確率変数の平均と分散の情報だけが所与である条件のもとでのこの研究では、 $e_0, e_1$ の下限値 $a_0, a_1$ および $e_2$ の上限値 $b_2$ をそれぞれ $\mu_i - 2\sigma_i, i=0,1$ および $\mu_2 + 2\sigma_2$ の

2シグマ法によって与えるものとする。

## 5 電力不足発生確率と電力供給の関係

ここでは、電力供給量の変化に対する電力不足発生確率の変動を既述の Chebychev の確率不等式、Bennett の確率不等式および Hoeffding の確率不等式のもとで評価した結果を示す。以上の3つの確率不等式は個別の成り立ちをもつものの、いずれの場合も想定する確率変数の分布形には依存せず、ここでの電力不足発生確率の上界値を与えるものである。

ここに、再生可能エネルギーに基づく発電量が占める総電力供給量における割合の変化による電力不足確率への影響について検討する。これを目的として、予想されるピーク電力需要量に関する特性を固定し、また総電力供給量に関して、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1$  を一定に保ったまま、総発電量に占める  $\mu_1$  の割合が変化する状況について解析する。具体的に、予測されるピーク電力需要量  $e_2$  に関して、 $E[e_2]=\mu_2=94.0$ 、 $V[e_2]=\sigma_2^2=(0.015 \times \mu_2)^2$  とする。ここに、 $e_2$  の分散は、既述の関西電力ホームページにおける電力需要量に関する回帰モデルにおける変動幅がおおむね  $\pm 3\%$  程度と読めることに依拠した。またこれにあわせて、 $e_2$  の平均は既存設備での発電量の平均に対し、 $3\%$  程度の安全余裕を見込んだ設定とした。さらに、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$  として、 $\mu_1$  を  $0.5$  から  $10$  ( $\mu_0$  を  $99.5$  から  $90$ ) に変化させる。このとき、 $\mu_0$  と  $\mu_1$  の値に応じて  $V[e_0]=\sigma_0^2=(0.01 \times \mu_0)^2$ 、 $V[e_1]=\sigma_1^2=(0.30 \times \mu_1)^2$  と変化するものとした。ここに、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$  の組み合わせは、再生可能エネルギー由来の発電量が現状の約  $3\%$  である状態に対応させ、 $(\mu_0, \mu_1) = (90.0, 10.0)$  は、総期待発電量を一定としたまま、この比率を  $2020$  年度目標の  $10\%$  にあわせたものである。また、各確率変数の分散は平均の値に基づくスケール変換した値として与えた。

既述の3つの確率不等式を用いて評価した結果を図1に示す。同時に、提案する確率不等式を用いた評価システムによる電力不足発生確率が安全サイドに評価されることを例証する目的で、発電量  $e_0$ 、 $e_1$  およびピーク電力需要量  $e_2$  の分布として、それぞれ上記の平均や分散をもつ対数正規分布を与えたもとで評価される電力不足発生確率をシミュレーションにより求めた。具体的には、それぞれの平均と分散をもつ対数正規分布に従う乱数の組み ( $e_0$ 、 $e_1$ 、 $e_2$ ) を  $100$  万組発生し、 $e_2 - (e_0 + e_1) > 0$  となる回数をカウントすることにより、その性能を検証・評価した。図1には、このシミュレーションによる結果を併記しておいた。ただし、図1における横軸は、 $E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$  の条件のもとで  $\mu_1$  を変化させた場合の総発電量の平均

$E[e_0+e_1]=\mu_0+\mu_1=100$  に占める再生可能エネルギーによる発電量の平均  $E[e_1]=\mu_1$  の割合をパーセント表示したものである。また縦軸は、再生可能エネルギーによる発電量  $\mu_1$  の割合に対する電力不足発生確率をパーセント表示したものである。

図1の結果のように、シミュレーションによる電力不足発生確率は、提案するいずれの確率不等式を用いた電力不足発生確率評価システムにより評価される電力不足発生確率をも下回り、提案する電力不足発生確率評価システムによって、意図した通りに電力不足発生確率を安全サイドに評価することができることを示している。このような結果は、個々の確率変数  $e_0$ 、 $e_1$  および  $e_2$  の分布として、ベータ分布や正規分布等、他の分布形を想定した場合も同様であり、各確率不等式で評価される電力不足発生確率は、所期の通りに安全側に評価されているといえる。参考までに、平均と分散を図1での設定通りそれぞれ一定のまま、図1での対数正規分布に加えて、個々の確率変数  $e_0$ 、 $e_1$  および  $e_2$  の分布をすべてベータ分布、正規分布、一様分布として与えた場合の結果を図2にまとめた。ただし、ベータ分布は基本形として  $0 \sim 1$  を定義域として有する。これに対して、平均と分散が指定される値に一致するよう線形変換を施した。このとき、ベータ分布がパラメータの設定により分布形状を大きく変えることを考慮し、密度のピークが中心の左側にある場合と中心の右側にある場合をシミュレーションでは利用した。具体的には、密度のピークが中心の左側にある場合に関しては  $e_0$ 、 $e_1$  および  $e_2$  の値をすべてパラメータが  $2.5$  と  $5.0$  のベータ分布に基づき生成した。一方、密度のピークが中心の右側にある場合に関しては、これらをパラメータが  $7.5$  と  $5.0$  のベータ分布に基づき生成した。図2中においてこれらについては、それぞれ「 $B(2.5, 5.0)$ 」および「 $B(7.5, 5.0)$ 」として表記しておいた。

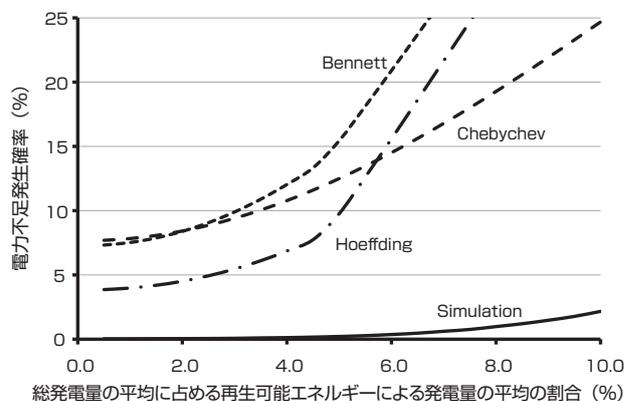


図1  $(\mu_0, \mu_1)$  の変化による電力不足発生確率の挙動

当然ながら、想定する個々の確率変数  $e_0$ 、 $e_1$  および  $e_2$  の分布の相異は電力不足発生確率の違いをもたらす。ただし、図1の結果との比較から、図2でのいずれの想定のもとで評価される電力不足発生確率が、この研究で提案する確率不等式に基づき評価される電力不足発生確率を確実に下回っていることが確認される。すなわち、この研究で提案する確率不等式に基づく評価システムは、意図するように意志決定に際して、電力不足発生確率を安全サイドに評価するものであることが確認される。

またこの論文では3つの確率不等式を用いたが、これらはそれぞれの確率不等式の導出過程により性質が異なり、結果として  $e_0$ 、 $e_1$  および  $e_2$  の設定により電力不足発生確率の上界の値の大小関係が入れ替わることがわかる。ただし、これら評価される確率は、いずれも確率の上界を与えていることから、それぞれの確率不等式での評価値のうち最小の値を採用すればよいことになる。すなわち、図1の範囲においては、再生可能エネルギーによる電力供給量の値に応じて、HoeffdingあるいはChebychevの確率不等式による評価値が採用されることになる。

ちなみに、図1においてBennettおよびHoeffdingの確率不等式による評価値が滑らかな変化を与えないことがわかる。BennettおよびHoeffdingの確率不等式では、式(5)のように考慮すべき確率変数の平均値からの変動幅の最大値が考慮される。また、この研究では各確率変数の変域を平均値 $\pm 2 \times$ 標準偏差で与えるものとしている。ここに、上記設定のように $(\mu_0, \mu_1)$ が変化する場合、 $\mu_1 > 4.7$ においては、 $B=2 \times (0.30\mu_1)$ として $B$ が $\mu_1$ に対応して与えられる。一方、 $\mu_1 \leq 4.7$ においては $B=2 \times (0.015\mu_0)=2.820$ と一定値となる。このため、BennettおよびHoeffdingの確率不等式での電力不足発生確率の変化の挙動が図1のような様相を示す。

また、確率不等式を用いた電力不足発生確率の値がシミュレーションによる値に比べてかなり大きめに評価され

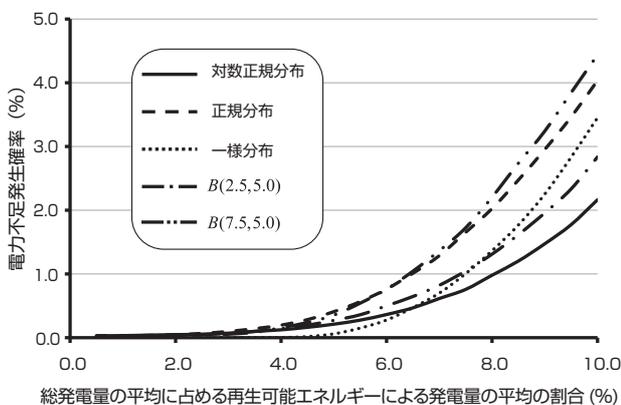


図2 仮想分布形によるシミュレーション結果の比較

ることに一定の留意が必要である。すなわち、確率不等式による電力不足発生確率の値は最も悲観的に見た場合における値であり、この数値をもっていたずらに不安感を煽るべきものではない。また参考として、図1での結果において、再生可能エネルギーが3%である現状での電力不足発生確率のシミュレーション値は0.0717%で、再生可能エネルギーが10%である2020年度ベースでの電力不足発生確率のシミュレーション値は2.180%であることを申し添えておく。このことから、例えば現状での既存発電システムによる電力供給量を単純に再生可能エネルギーでの電力供給量に置換していく場合には、再生可能エネルギーへの計画的移行で少なくとも電力不足リスクが30倍近くになることが読み取れる。

## 6 電力不足発生確率と節電率の関係

現状のような電力供給量を増加することが難しく、需給バランスが逼迫する状況において、電力不足の発生を避けるためには、予想される電力需給バランスに基づき、必要に応じて節電要請を行う必要がある。しかしながら根拠のない強引な節電要請は経済活動を圧迫し、社会システムのバランスそのものを揺るがす可能性もある<sup>[3]</sup>。このことから、節電率と電力不足発生確率に関する何らかの科学的根拠のもとで、節電要請率が決定されるということが説明責任として求められる。この際、総電力供給量の期待値(平均)と電力需要量の見積もり(平均)だけによる節電要請率ではなく、これらの平均に加えて、ばらつき(分散)をも考慮した結果としての節電要請率である方がより説得力があることはいうまでもない。そこで以下では、要請される節電率の根拠に関する説明責任に対して、提案する確率不等式を用いた評価システムの果たす役割について例証する。

以下では発電量  $(e_0, e_1)$  に関して、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$  および  $V[e_0]=\sigma_0^2 = (0.01 \times \mu_0)^2$ 、 $V[e_1]=\sigma_1^2 = (0.30 \times \mu_1)^2$  の状況に対して、既存発電システムによる発電量が15%減少した状況、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0 \times 0.85, 3.0)$ を想定した上で、要請すべき節電率を導くことを考える。このとき、図1からわかるように、確率不等式を用いた電力不足発生確率は大きく安全サイドに評価される。これより、節電要請率の決定にあたって、確率不等式を用いて評価される電力不足発生確率に対して、実際に要求される水準の数値を設定する方法はこの研究では必ずしも適切とは考えない。

この研究では、図1における現状の $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$ である状態が電力需給バランスに関して電力不足発生確率が安定的な状態あるいはそれに近い状態であると解釈する。これより、確率不等式の適用に関し、既存発電シス

テムによる発電量が 15 % 減少した状況における電力不足発生確率が、既存発電システムの発電量が減少する以前の状態での電力不足発生確率と同等あるいはそれを上回らないことを保証する節電率を適切な節電率と考える。ここに、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0, 3.0)$  のもとで、確率不等式により評価される電力不足発生確率の上界値は Hoeffding の確率不等式により、5.462 % と与えられる。

ここに、節電率  $\gamma$  のもとで電力使用量  $e_2$  が非節電時の比率  $(1 - \gamma)$  での使用状況を想定することになる。このとき、節電率  $\gamma$  のもとで電力使用量  $e_2$  の平均と分散はそれぞれ  $((1 - \gamma) \mu_0, (1 - \gamma)^2 \sigma_0^2)$  と与えられることになり、 $(\mu_0, \mu_1) = (97.0 \times 0.85, 3.0)$  と発電量が減少した状況において、節電率の変化にともなう電力不足発生確率を  $\gamma$  に対応して評価する。以下ではこのことに勘案し、電力不足発生確率を  $\Pr\{e_0 + e_1 < e_2 \mid \gamma\}$  と表記する。

このような設定のもとで、提案評価システムにおいて評価される電力不足発生確率の上界値に関する結果を図 3 に示す。ただし、ここに、3 つの確率不等式により評価される電力不足発生確率の上界値に関して、既述のことから、それらの最小の値を採用すればよいことになる。すなわち、図 3 の例では  $\gamma = 13.63$  (%) を境に Chebychev の確率不等式による評価から Hoeffding の確率不等式による評価に移行する。これを抽出したのが図 4 である。

この結果、Hoeffding の確率不等式に基づき評価される節電率  $\gamma$  の変化に対する電力不足発生確率の上界値が 5.462 % となる節電率として、 $\gamma = 14.66$  (%) が与えられる。一方、既存発電システムによる発電量が 15 % 減少した状況は平均的に総発電量の 14.55 % が喪失した状況である。すなわち、発電量が減少する以前の水準での電力不足発生確率の上界値を保証するためには総期待発電量の減少分 14.55 % を若干ながら上回る 14.66 % の節電率を必要とすることがわかる。ここで、減少分 14.55 % の値に

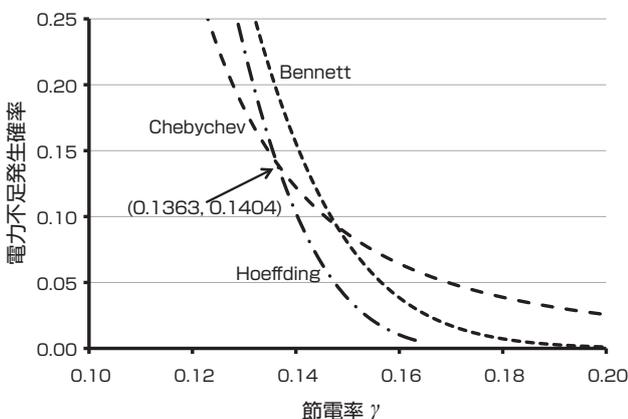


図3 各種確率不等式による節電率  $\gamma$  に対する電力不足発生確率

対し、同水準の 5.462 % の電力不足発生確率の上界値の水準を維持するために 14.66 % の節電を要するという解析結果は、必要以上に過度の節電が必要ではないという結果を示している。このことから、提案する確率不等式による評価値に基づく節電要請率の信頼性が担保されると考える。ただし、わずかとはいえ喪失分よりも大きな節電率が得られたことは、単なる平均的な評価に基づき、喪失分の節電を行うだけでは必ずしも十分とはいえないということを示していると解釈される。これは、発電量および電力需要量の変動要素として、おのおのの分散の情報を考慮したことによる効果であり、提案する電力不足発生確率の上界値の水準を維持するという基準での節電要請率の適切な安全志向の性質を表すものと解釈する。

同様の結果は、既存発電システムによる発電量の他の喪失割合のもとでも観測された。以上のことから、この研究で考察した確率不等式に基づく電力不足発生確率の評価法のもとで策定される節電要請率が現実的な要請に 대응するものであり、また平均的な評価に基づき策定される節電要請率に比べて適切な安全志向の性質を有することがわかった。加えて、平均の情報に加えて、発電量や電力需要量に関する分散の情報をも考慮していることは、これにより導かれる節電要請率に関する信頼度の向上ならびに説明責任の遂行に寄与するものと考えられる。

## 7 おわりに

この研究では電力供給量と電力需要量のバランスが逼迫した状況にあり、電力供給源として再生可能エネルギーに期待が寄せられつつある現状、および再生エネルギーによる発電を含む電力供給システムにおける不確実性と電力需要量に関する不確実性が存在する現状に鑑み、このような状況において電力不足が発生する確率を評価するためのシステムについて考察した。具体的には、上記のよう

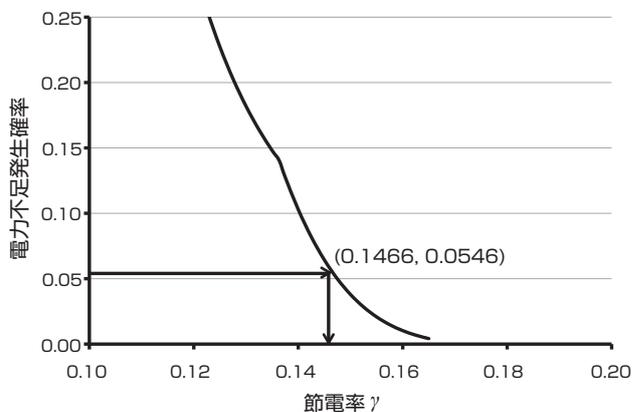


図4 提案評価システムにおける評価例

な不確実性を内包する状況であることを勘案し、最悪のシナリオでの電力不足発生確率を評価する目的で確率不等式に基づく評価システムを提案した。さらに、提案システムを用いて、状況に応じて適切な節電要請を行う場合の説明責任を果たすための方法について考察した。

ただし、本提案システムによる評価結果による施策策定、すなわちこの場合の直接的な施策としては節電要請率の決定、また付随的な施策としての再生可能エネルギーに基づく発電システムの計画策定等においては、確率不等式の性格を十分周知し、情報公開の上で行われるべきであることに留意しなければならない。もとをたどれば、電力供給量  $e_0$  および  $e_1$  や電力需要量  $e_2$  に関する平均や分散の予測値に関する情報に関しても十分な情報公開を必要とするところである。これに関しては、既存の電力各社および政府関係筋に、より一層の情報開示を望むものである。逆にいえば、提案評価システムの使用を前提に、これに供すべき情報に関して、一層の情報開示を電力各社ならびに政府関係筋に要請することができる。

ちなみに、現状関西電力では、地域住民の数々の疑問に答えるべく、情報公開の努力を行っている<sup>[10]</sup>。ここに、電力需要量ならびに電力供給量が、この研究で想定するように日々変動し、またこれらの予測値に基づき節電要請が考慮されていることがわかる。ただし、これより平均特性にあたる予測電力需要量ならびに予測電力供給量に関する情報は得られるものの、これらの予測誤差等、バラツキ（分散）に関する情報は得られない。ただし、これらの分散に関する情報も平均値と同様、意志決定における重要な情報である。これより、上記のように一層の情報公開を望むものである。

また、この研究では、既存の確率不等式を援用しているに過ぎず、必ずしも技術的な新しい開発を行っているわけではない。同様の立場は、上記の平均や分散、あるいは上下限值に関するものもいえる。ここに、例えば電力需要量の予測精度の向上は節電要請率の策定に直接大きな影響を与える。このことを勘案すれば、例えば電力各社に蓄積された過去の実績データを1次データとして、これに基づき、より精度のよい平均や分散の情報導出を可能とする予測法・推定法の開発は重要な問題である。また、確率不等式は最悪値としての評価値を与えるものであるため、ややもすれば過剰な評価値をもたらす可能性は否めない。すなわち、確率に関する不等関係をよりタイトに与える、より性能のよい確率不等式を考案することができれば、より効率的な施策の策定が可能となる。

ここで、この研究で採用した確率不等式について幾分かの説明を加える。この研究において評価される確率は、

本来発生させるべきでない電力不足の発生確率であるため、比較的小さな値として評価されるべきものである。したがって、ここで確率不等式に求める性能としては、与えられる条件制約のもとで保証されるべき確率の上界をいかに小さく与えるかということである。ただし、確率不等式にて評価される確率の上界は、所与とされる情報の量に影響を受けることは当然である。したがって、確率不等式の性能の評価は、与えるべき情報の量とこれによる評価値の両面を考慮すべきであり、一意に最も優位な確率不等式を示すことは必ずしも容易ではないことに留意されたい。

ここに Markov の確率不等式<sup>[11]</sup>は、確率論に関する各種の教本で示される基本的な確率不等式であるが、確率変数の平均値のみの情報を所与条件として、より少ない情報で上側確率の上界の評価が可能である反面、評価値そのものは直接的な利用において実用上有益なものとはいいがたい。同じく、基本的な確率不等式として知られる Chebychev の確率不等式<sup>[6]</sup>は、確率不等式の平均と分散を利用し、上側確率の上界の評価が可能である。よって、この研究では電力需要に関してその予測において平均と分散が想定される場合を考えていることから、まずこれを検討の一つとした。また、変数の平均と分散に加えて、範囲の情報を利用する Bennett の確率不等式<sup>[7]</sup>さらに Hoeffding の確率不等式<sup>[8]</sup>をこの研究では採用している。

これらの採用に関しては、変数の範囲について、既述の通り平均と分散を利用して代替的に与えるこの研究での工夫を含め、現実に観測可能であることも関係している。なお、Bennett の確率不等式に関する考察は Hoeffding の成果<sup>[8]</sup>の基礎となっている。また、Hoeffding の確率不等式は、同じ所与条件のもとで評価される確率の上界について、現存する確率不等式の中で極めて有用であることがいくつかの文献<sup>[12][13]</sup>で言及されている。また、Hoeffding<sup>[8]</sup>では、変数の上限と下限の情報だけにに基づいて上側確率の上界を与える不等式も別途提案されている。ただし、この研究でのように変数の平均と分散の情報を所与とする状況においては、この Hoeffding によって別途規定された確率不等式による確率の上界は、この研究において採用した Hoeffding の確率不等式によるそれと比べて、より大きな値を与えるため、ここではこれを採用しないものとした。

他に著名な確率不等式として Chernoff の確率不等式が存在する。Chernoff の確率不等式は、Bennett や Hoeffding の確率不等式と同様に、確率変数の和の分布の上側確率の上界評価を与える。ただし、確率変数の確率分布に関する情報を利用することによって、確率変数の和の分布の詳細な上側確率の解析を可能とする<sup>[14]</sup>

[15]。このため、この研究で考察する状況において、このChernoffの確率不等式を採用することは適当ではない。

確率不等式については所与となる情報の設定や上側確率の上界等の評価値、また確率不等式の要諦となるアイデアに各種の提案があるものの、確率不等式を利用して電力不足発生確率の上界を評価することを目的とするこの研究での提案システムは、以上の考察から現状でひとまずの完成形を得ているものと考えられる。ただし、既存の確率不等式を同一の条件のもとでその性能の向上を与えることも考えられる。さらに、既存の確率不等式に工夫を加え、これを採用することで、この研究での目的に対して、より有用な結果を得ることも考えられる。より厳格な確率の上界を与えるとの意味において性能のよい確率不等式を考察することは、より正確で効率的な意志決定を行うために意味のある課題である。その意味で、著者らにおいても、これらの課題に関しては現時点も継続的に考察を重ねているところである。

以上を要約するとこの研究の成果ならびに課題は下記のように表すことができる。

1. この研究では、確率不等式を主たる要素技術として、不確実性を内包する電力需給量に関する情報に基づき最悪のシナリオでの電力不足発生確率を評価するための評価システムを提案した。
2. 提案したシステム運用に必要な入力情報に関して、入力情報に関する元データ（過去の実績データ）の開示が必ずしも十分ではないという現状の問題点を考察し、またこの元データが開示された場合にこれを有効に活用するための推定法に関する考察が必要となることを予想した。
3. 確率不等式に基づく提案システムを用いて、より効率的・効果的な意志決定を行うために確率不等式自体の性能向上が課題であることを明示した。

上記のことごとから、著者らは、本提案システムを中心に、あるいはたたき台として、より一層このような社会的要請に応えるために、より多くの研究者により補完されることを願っている。例えば、データ分析の分野でも多くの気鋭の若手研究者が存在する。電力会社が情報を開示すれば、これらの知見が結集することにより、より精度のよい平均や分散、および最大値と最小値等の推定法が提案される可能性がある。この際、本提案システムはその基礎となるべき要件を少なくとも備えているものと考えられる。この研究は、そのような意図のもとに、確率不等式に基づく評価システムを提案するものである。

## 参考文献

- [1] 朝日新聞: 東電、火力発電所再稼働へ、2011年3月18日朝刊
- [2] 朝日新聞: 原発ゼロ 試練の冬、2011年12月18日朝刊
- [3] 山本周吾: 東日本大震災による電力不足と日本経済 - 符号制約VARによる節電と電力供給削減の生産・雇用への影響 -, 神戸大学経済学研究科 Discussion Paper, 1119, 1-13 (2011).
- [4] 竹本康彦, 岩本史恵, 有菌育生: 限定された需要情報のもとで許容欠品率を保証する発注点の決定法に関する一考察, 日本経営工学会論文誌, 62 (1), 21-24 (2011).
- [5] 新里 隆, 郭 偉宏: レンド効果を考慮した安全在庫管理の大偏差統計的解析, 日本経営工学会論文誌, 62 (4), 164-173 (2011).
- [6] J.R. Birge and F.V. Louveaux: *Introduction to Stochastic Programming*, Springer (1997).
- [7] G. Bennett: Probability inequalities for the sum of independent random variables, *J. Am. Stat. Assoc.*, 57 (297), 33-45 (1962).
- [8] W. Hoeffding: Probability inequalities for sums of bounded random variables, *J. Am. Stat. Assoc.*, 58 (301), 13-30 (1963).
- [9] 関西電力: 電力需給のお知らせ, <http://www.kepco.co.jp/setsuden/graph/index.html>, 2012年6月12日閲覧
- [10] 関西電力: 供給量が毎日変わる理由, [http://www.kepco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop\\_pdf/forecast.pdf](http://www.kepco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop_pdf/forecast.pdf), 2012年11月15日閲覧
- [11] 海津 聰 訳: *不等式の工学への応用*, 森北出版 (2004).
- [12] M. Talagrand: The missing factor in Hoeffding's inequalities, *Ann. Inst. H. Poincaré-PR*, 31 (4), 689-702 (1995).
- [13] V. Bentkus: On Hoeffding's inequalities, *Ann. Probab.*, 32 (2), 1650-1673 (2004).
- [14] C. H. Papadimitriou.: *Computational complexity*, Addison-Wesley, Massachusetts (1994).
- [15] M. Mitzenmacher and E. Upfal: *Probability and Computing, Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis*, Cambridge University Press (2005).

## 執筆者略歴

有菌 育生(ありぞの いくお)

1985年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程中退。同年より、大阪府立大学工学部助手、1990年同講師、1994年同助教授、2000年大学院部局化にともない、大阪府立大学大学院工学研究科准教授を経て、2011年より、岡山大学大学院自然科学研究科教授。この論文では、全体構想、シナリオ構築およびシステム構築を担当。



竹本 康彦(たけもと やすひこ)

2004年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年より、兵庫県立大学経営学部助手、2007年より県立広島大学経営情報学部准教授。この論文では、システム構築、数学的検証および数値検証を担当。



## 査読者との議論

## 議論1 この論文の意義

コメント（立石 裕：産業技術総合研究所つくばセンター、石井 格：国立科学博物館）

東日本大震災の影響で原子力発電所の運転がおよそ停止したことから、電力供給の制約が厳しくなり、大規模なブラックアウトが現実のリスクとして考えられる状況になっていますが、電力に関する情報は供給・需要の両面において、電力会社のコントロール下にあり、過去データに基づく回帰モデル以外に、社会全体としてリスク管理のための客観的なツールが見当たらない状態にあります。こうした背景を考慮すると、不確実性のある電力供給量ならびに電力需要量に関する限定的な情報を用いて、確率不等式により電力供給不足の発生確率を評価し、それに基づき節電率の客観的な説明を試みる、というこの論文のシナリオは一応説得力があると思います。社会的価値の創造を目的とするシンセシオロジーとしては、やや異質な内容ではありますが、価値創造につながる一つの合理的な方法論を提示しているという点においてシンセシオロジーの論文としての意義は十分であると思います。しかし、このような評価システムは、社会的に受容され、現実の意思決定過程において具体的な役割を果たさないと、単なる机上検討に終わってしまい、それではシンセシオロジーの趣旨からは不完全と言わざるを得ません。この論文の内容を実際の電力システムに適用する上では、今後検討すべき課題がいくつか考えられます。例えば、入手できる情報の制約から、供給量の変動、需要量の変動とも、実際に想定される確率分布曲線ではなく、平均値と分散を用いた評価を行っています。この簡略化は結論にどの程度の誤差を与えるのでしょうか？また、供給側の変動には保守による計画停止等の人為的因子も含まれ、気象条件に左右されるところの大きい自然エネルギーの変動と同一に扱ってよいのでしょうか？こうした将来の課題も含めて、シンセシオロジーへ投稿された狙いをご説明いただけるとよいと思います。

回答（有蘭 育生）

この研究は、昨今の電力需給事情に勘案し、著者が専門とする経営工学、オペレーションズ・リサーチ、応用統計学の見知から何らかの貢献を果たすべきとの観点から考察したものです。その意味で、ご指摘のように、提案する評価システムが社会的に容認されるためには、当該システムでの意志決定過程ならびにその解釈において、一定の説得力を必要とします。それに対し、提案評価システムを用いての意志決定が社会的に容認されるよう論旨を整理しました。

また、この研究に関し、「社会的価値の創造を目的とするシンセシオロジーとしては、やや異質な内容ではありますが、価値創造につながる一つの合理的な方法論を提示しているという点においてシンセシオロジーの論文としての意義は十分であると思います。」としてご理解を賜りましたことにお礼申し上げます。その上で、「シンセシオロジーへの投稿意図」について述べさせていただきます。

まずシンセシオロジーへの投稿を考えた第1の理由としては、「社会の側から研究成果を汲み上げてもらうという受動的な態度ではなく、研究成果の可能性や限界を良く理解した研究者自身が研究側から積極的にこのギャップを埋める研究活動（すなわち本格研究<sup>注2</sup>）を行うべきである」と考える。」というこの学術ジャーナルの発刊の趣旨にあります。この研究は極めて今日的課題を取り上げており、震災および原子力発電所の事故以後の新しい価値観のもとでのシステム構築にあたり、発刊の趣旨でいう「基礎研究の成果を自然淘汰にまかせる」のではなく、むしろ議論の発端としての提案を行うことが必要であるとの認識がシンセシオロジーの発刊趣旨に沿うものであると考えたからに他なりません。「これまでの学術雑誌は、科学的発見といった基礎研究の成果としての事実的知識を集積してきた。これに対して、研究成果を社会に活かすために行うべきことを知として蓄積する、すなわち当為的知識を集積することを目的として、ここに新しい学術ジャーナルを発刊する。自然についての知の獲得というこれまでの科学に加えて、科学的知見や技術を統合して社会に有益

なものを構成するための学問を確立することが、持続的発展可能な社会に科学技術が積極的に寄与するための車の両輪となろう。」および「この「Synthesiology」と名付けたジャーナルにおいては、成果を社会に活かそうとする研究活動を基礎研究（すなわち第2種基礎研究<sup>注4</sup>）として捉え直し、その目標の設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスが記述された論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に活かす研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。」という趣旨に賛同し、またこの研究がその趣旨に相応しいものと考え、投稿に至りました。

その意味でいえば、ご指摘とおり、この論文の内容を実際の電力システムに適用する上では、今後検討すべき課題がいくつか考えられます。この研究論文では、確率不等式を用いた方法論を提案するとともに、この方法論を活用するための現状の課題を明らかにし、さらに提案した方法を端緒として、さらに研究者の知をくわえることが必要であることを主張しています。このこともまた、「共に議論するためのジャーナル」という発刊趣旨に共感するとともに、この研究が相応しいものと考えています。すなわち、シンセシオロジー誌の目的である「従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実的知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行えば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。」にこそ、この研究を当ジャーナルに投稿した意図が集約されています。

なお、この研究に関する将来の課題として、提案システムに供されるべきデータの入手をはじめ、確率不等式の性能向上等いくつかのものが存在します。これらに関しては、論文中の「7.おわりに」において要約しています。

## 議論2 モデルの展開

コメント（立石 裕）

論文の導入部分では、再生可能エネルギーの役割への期待と電力需要予測における問題点が指摘され、これを考慮した予測モデルの定式化が試みられています。しかし、議論の筋道を追ってみると、問題解決において、再生可能エネルギーの存在は本質的な要素ではなく、電力供給不足の根源は、供給量とおよそ同等の大きさをもつ需要量の決定論的な予測が困難であり、確率論的な予測しかできないという不確実性があるように読み取れます。であるとすれば、第一近似としては、まず、再生可能エネルギーを無視して、需要量と既存発電量のバランスだけで評価を行い、著者の提唱するモデルの妥当性を検証した方が論理的にはすっきりすると思います。次のステップとして、再生可能エネルギーを考慮すると、どのような効果が想定されるのか、また再生可能エネルギーの供給量がどの程度になればこの影響が顕著になるのか、という議論の流れの方がよいと思います。また、分散の感度分析が述べられていますが、その前にまず、再生可能エネルギー量自体の感度分析が必要だと思えます。

回答（有蘭 育生）

この研究の初期投稿原稿作成時に、ちょうど再生可能エネルギーによる電力買取の制度化等が議論されていました。これにより固定買取価格制度も本格的にスタートし、場合によれば再生可能エネルギー由来の電力が原子力発電を含む既存の発電システムを代替していくことも考えられます。この研究は、そういう事態を積極的に考慮しようとの意識のもとに考察を進めてきました。ただ、ご意見ももっともですので、本改訂稿においては、現時点の状況からスタートし、2020年度目標に至る状況として、再生可能エネルギーによる電力供給量を扱うものとし、また旧稿での感度分析に関しましては、ご意見いただいた「再生可能エネルギー量自体の感度分析」に主旨を改め、改訂稿での図1のように再生可能エネルギーの占める割合の変化に関するものとして考慮しました。

### 議論3 評価結果の解釈と運用

質問（立石 裕）

提案システムのアウトプットである電力不足発生確率を、どのように解釈して運用するのかについての考え方が提示されていないので、現実社会においてどのような使い方をすべきなのかがはっきりしません。4章の最後で、結果の使い方には注意しなければならないという趣旨のリマークがあり、著者としての判断は差し控えて、そこには踏み込まないというスタンスのように見えますが、やはり、どのような使い方が考えられるのかという著者の主張がないと、読者としては評価のしようがないと思います。提案されているモデルの論理的妥当性は疑いようがないと思いますが、問題はそこにあるのではなく、まさしく、そこからどのような意思決定につながる結論を導くか、ということにあると思います。例えば、具体的には発生確率が何%以内であれば、問題ないと考えるのでしょうか？

回答（有蘭 育生）

この点が、いただいたご教示の内容として最も重要であり、かつ旧稿において曖昧な部分であったと反省しました。たしかに確率不等式による電力不足発生確率は最悪時のものとして解釈することができますが、この確率に関して容認される水準をどのように与えるのかについては旧稿では明言を敢えて避けていました。そこで本改訂稿におきましては、現状の水準を維持するという観点からこれを与えるものとなりました。これにより、提案評価システムに基づく意志決定の意味合いを明瞭化したと考えています。

### 議論4 分布の定義

コメント（立石 裕）

発電量や需要量の「分布」という表現が用いられていますが、「何に対する分布」なのかが明記されていないので、現実の議論に落とすときに、具体的にどのようなデータを使えばよいのかが見えません。

回答（有蘭 育生）

本稿で記述のように、一昨年度の関西電力のホームページに日中最高気温と電力需要量の関係に関する回帰モデルが若干の現実データと共に掲載されていました。すなわち、同じ日中最高気温に対して、電力需要量は一定ではなく、ばらつきます。回帰モデルはこのバラツキを確率的変動として捉え、このバラツキをもつデータの平均的特徴を捉えようとするモデルです。同様に、再生可能エネルギー由来の電力供給量は天候等の影響を受けざるを得ず、同じ日中最高気温の条件でも変動します。また、既存発電システムによる発電量も必ずしも全システムが設計発電量を常に保証するとは限らず、設備保全の問題等で若干の変動を考慮しておくべきだと考えました。この研究では、上記回帰モデルの適用から勘案されるように、これら電力需要量、各発電量のバラツキを確率的変動と捉えています。実際には、翌日の気候条件等に基づき、例えば翌日の最大電力需要量の予測値と予測誤差を平均と分散に対応させるものとしています。

ただし、現実にはこのような電力需要量や発電量に関する平均や分散といった情報は電力各社には過去のデータとして蓄積されているものの、これらのデータが正式に公開されているとはいえません。そのため、提案評価システムに関する本稿での数値検証においては、擬似的に策定した値のもので計算結果を提示しています。本来は、この部分に現実の蓄積データ等を1次データとして供給し、必要な平均や分散を算定することが考えられます。またこの際、本改訂稿では論旨の明確化のため削除した旧稿での「日本道路交通情報センターの渋滞予測」法を援用することができるかもしれません。あるいは、電力会社等から供給される蓄積データに基づきこれら提案評価システムに供されるべき平均や分散の情報を得るための斬新な方法が開発されるかもしれません。ただし、それらは電力会社等に蓄積されているであろうデータの公開を前提とします。この研究の目的の一つは、提案評価システムを現実に機能させるためには、電力会社等の蓄積情報が必要であることを示し、逆説的ではありますが、こ

れをもって電力会社等に一層の情報公開を促す契機としたいということにあります。現状関西電力では、地域住民の数々の疑問に答えるべく、情報公開の努力を行っています。（[http://www.kepeco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop\\_pdf/forecast.pdf](http://www.kepeco.co.jp/setsuden/graph/pop/pop_pdf/forecast.pdf)）

この資料から、電力需要量ならびに電力供給量（発電量）が、この研究で想定するように日々変動し、またこれらの予測値に基づき節電要請が考慮されていることがわかります。ただし、平均特性にあたる予測電力需要量ならびに予測電力供給量に関する情報は得られませんが、これらの予測誤差等、バラツキ（分散）に関する情報は得られません。さらにこの資料から、本稿でいう既存発電設備による電力供給量にも変動要因が存在することがわかります。このため、改訂稿におきましては、旧稿では確定値としていた既存発電設備による電力供給量（発電量）をも変動する確率変数として扱うように改めました。

### 議論5 確立不等式の特徴と選択

質問（立石 裕）

3つの確率不等式が使われていますが、説明なしに出てくるので、意味合いが理解できません。それぞれに特徴があって、得意不得意、利用上の注意点等があると思いますが、今回の目的に使用するにあたって必要な範囲で簡単な説明があった方がよいと思います。それから、この3つで、使えそうな不等式は尽くされているのでしょうか？

回答（有蘭 育生）

この研究で採用した3つの確率不等式の採用理由を追記しました。4章の最初の段落に示すように、Bennettの確率不等式およびHoeffdingの確率不等式の定義においてChebychevの確率不等式では必要な確率変数の変域についての情報を必要とします。今回は条件を合わせるためにこの変域情報を2シグマ法に基づき与えています。このように各確率不等式の出自の違いもあり、確率不等式の性能に関して確実に得意不得意を明記することは容易ではありません。ただし、Hoeffdingの確率不等式は、これが提案された論文が、Talagrand（“The Missing Factor in Hoeffding’s Inequalities”, *Annales de l’Institut. H. Poincaré Probab. Statistiques*, Vol. 31, No. 4, pp. 689-702 (1995)）やBentkus（“On Hoeffding’s Inequalities”, *The Annals of Probability*, Vol. 32, No. 2, pp. 1650-1673 (2004)）により、“celebrated paper”等と呼ばれるように特に性能に優れた確率不等式として認識されています。この事実ならびにこの論文に追記した3つの確率不等式の採用理由から、ここでの提案においてこの3つの確率不等式の併用で十分であると考えています。ただし、現在別途研究として、Hoeffdingの確率不等式の性能向上ならびにより高性能な確率不等式の開発にも着手しているところです。

### 議論6 シミュレーションにおける異なる分布の影響

コメント（立石 裕）

5.のシミュレーションで、対数正規分布を用いた計算例が示され、他の分布たとえば、ベータ分布や正規分布を用いても同様、と記されていますが、実際にどの程度差があるのかわからないか示していただいた方が説得力があると思います。

回答（竹本 康彦）

参考として、図1での対数正規分布にくわえて、個々の確率変数 $e_0$ 、 $e_1$ および $e_2$ の分布をすべてベータ分布、正規分布、一様分布として与えた場合の結果を図2にまとめておきました。ただし、ベータ分布は基本形として0～1を定義域とします。これに対しては、平均と分散が指定される値に一致するよう線形変換を施しました。このとき、ベータ分布がパラメータの設定により分布形状を大きく変えることを考慮し、密度のピークが中心の左側にある場合と中心の右側にある場合をシミュレーションでは利用しました。図1の結果との比較から、図2でのいずれの想定のもとで評価される電力不足発生確率が、この研究で提案する確率不等式に基づき評価される電力不足発

生確率を確実に下回っていることが確認されます。なお、以上のことについては、この論文の図2の説明に対していまま少し記述しています。

## 議論7 節電率の解釈

コメント（立石 裕）

6. の記述がちょっと分かりにくいのですが、ここの結論は、例えば発電量が15%減少した場合、電力不足発生確率を等価にするという条件を課せば、節電率は14.66%で十分であり、15%を超えるような設定は不要である、という理解でよろしいでしょうか？であるとすれば、もっと広範な計算結果を示していただいた方がよいと思います。例えば、発電量の低下率と節電率の関係を、再生可能エネルギーによる発電割合をパラメータとして数ケースについて示していただければ、読者が本手法の有用性を評価する上で役に立つのではないかと思います。

回答（有蘭 育生）

ご質問にある15%減は総発電量の平均 $\mu_0 + \mu_1=100$ の15%減ではなく、ここでは例えば原子力発電所の停止により、既存発電設備における発電量が減少した状況を想定しています。これにより、6章での数値例においては、「一方、既存発電システムによる発電量が15%減少した状況は平均的に総発電量の14.55%が喪失した状況である。」となります。このとき、総発電量の平均 $\mu_0 + \mu_1=100$ に対する喪失電力量比率14.55%に対して節電率が14.66%必要となると

の結果を与えています。すなわち、ご質問にある「発電量が15%減少した場合、電力不足発生確率を等価にするという条件を課せば、節電率は14.66%で十分であり、15%を超えるような設定は不要である。」という理解は誤解です。この論文「すなわち、発電量が減少する以前の水準での電力不足発生確率の上界値を保証するためには総期待発電量の減少分14.55%を若干ながら上回る14.66%の節電率を必要とすることがわかる。」から、むしろ総発電量から平均的に喪失される14.55%に対し、これを上回る14.66%の節電が必要になるというのが解析結果となっています。つまり、単純に平均的に喪失電力量を節電するのでは十分とはいえないという解析結果が与えられます。これは、平均的な評価ではなく、平均と分散を加味した評価の必要性を意味しています。この論文にも述べているように、主として各電力会社の蓄積データの開示が十分でない現状から、この研究では解析結果に関して、特に重きをおいているわけではありません。ただ、ここでのように平均と分散に基づく必要節電率の解析結果を示すことで、平均的な評価に基づく節電要請率の決定法が十分といえないことを示し、より妥当な節電要請率の決定法として提案システムを寄与させることを目的としています。また、提案システムを有効利用するためには、電力各社および政府関係の一層の情報開示が必要不可欠です。この事実をもって、電力各社および政府関係に一層の情報開示を求めるといことがこの研究の価値であるとも考えています。