

統計モデルを用いた震災後の 東電・東北電管内の節電量の推定

比護 貴之¹、高橋 雅仁^{2*}、所 健一¹

1: (財) 電力中央研究所 システム技術研究所

2: (財) 電力中央研究所 社会経済研究所

要約:

東日本大震災後、東電・東北電管内で電力供給不足が発生し、社会全体で節電への取り組みが行われた。今夏の節電への取り組みとその効果を分析・総括しておくことは、今冬以降の節電対策を考える上で重要である。本稿では気温、鉱工業生産指数、年周期を説明変数とする比較的自由度の高い統計モデルを用いて、ベースライン需要（震災影響が無かった場合に生じたであろう電力需要）を推定し、震災後から9月末日までの東電・東北電管内における各日・各時刻の需要実績と比較することで、震災後の需要減少量を推定する。また、鉱工業生産指数を考慮し、生産量低下による需要減少と節電による需要減少を分離する。分析の結果、以下のことが分かった。

- 東電管内では、2011年は前年に比べて日最大需要（実績平均）が1016万kW減少しており、そのうち204万kWは日最高気温の平均が前年より1.4℃減少した効果であり、残りが震災影響による。気温影響を除外してもピーク需要は15.6%減少した。同様に東北電管内では日最大需要が245万kW減少し、そのうち70万kWは日最高気温の平均が1.7℃減少した効果である。気温影響を除外してもピーク需要は15.3%減少した。また、東北電管内の需要減（245万kW）に対して生産量低下による需要減（37万kW）が占める割合は15%と、東電管内の同割合（3%）に比べて大きい。
- 7-8月の曜日毎の13-16時の需要減少量を見ると、東電・東北電管内共に木曜が多い。平日のみに着目すると、東電管内では曜日間の差異が小さい。一方、東北電管内では木曜の節電率が他の平日に比べて大きい。自動車業界で稼働日を木金から土日へシフトした効果の可能性もある。
- 両管内共に、ピーク時間帯である平日14時の節電率が使用制限期間中は高く、それに比べてオフピーク時間帯である平日の早朝5時や休日の節電率は低い。平日のピーク時間帯での節電が積極的に行われたことが分かる。また、東電管内のオフピーク時間帯の節電率は7月以降同水準で推移したが、東北電管内では、平日5時、休日5時の節電率は7月以降減少しており、夜間需要が増加したことが分かる。
- 前年と比べると、2011年夏の気温感応度（平日14時）は、東電管内では53万kW/℃、東北電管内では19万kW/℃減少した。冷房需要における節電の効果と解釈できる。

* Corresponding author. [03-3201-6601（代表）、m-taka@criepi.denken.or.jp]

■ この論文は、<http://criepi.denken.or.jp/serc/discussion/index.html> からダウンロードできます。

目次

1.	はじめに-----	1
2.	ベースライン需要の統計モデル-----	2
2.1.	統計モデルと説明変数-----	2
2.2.	AICを用いたモデル選択-----	3
3.	分析結果と考察-----	3
3.1.	節電量の定義-----	3
3.2.	震災以降の需要減少量の日変化-----	5
3.3.	時間帯別・曜日別の需要減少量の傾向-----	12
3.4.	節電量の気温依存性-----	14
4.	まとめ-----	15
	参考文献-----	15
	付録-----	16
A.	推定誤差-----	16
B.	気温の多項式回帰とルンゲ現象-----	17
C.	cAIC-----	18

免責事項

本ディスカッションペーパー中、意見にかかる部分は筆者のものであり、
(財)電力中央研究所又はその他機関の見解を示すものではない。

Disclaimer

The views expressed in this paper are solely those of the author(s), and do not necessarily reflect the views of CRIEPI or other organizations.

1. はじめに

東日本大震災後、東電・東北電管内で電力供給不足が発生し、今夏の大規模停電が懸念され、需要抑制目標15%が掲げられた。社会全体の節電への協力および気温が低めに推移した結果、15%（気温等補正前）を超える需要抑制がなされ、停電を回避することが出来た（資源エネルギー庁、2011）。しかし、原子力発電の稼働率が低下しており、今冬あるいはそれ以降にも、再び節電の必要性が高まる可能性もある。今夏の節電への取り組みとその効果を分析・総括しておくことは、今後の節電対策を考える上で重要である。

電力系統全体での需要減少量に関する先行調査としては、例えば、文献（資源エネルギー庁、2011）では電力9社管内における今夏の最大ピーク需要の減少率（対前年比）が報告されている（例えば、東電管内では18%、東北電管内では15.8%）。他にも、文献（西尾、2011）は、東京電力管内の震災後から7月下旬までの平日の需要減少量を報告している（例えば、6月下旬～7月下旬の需要減少率は前年比15%以上）。文献（永富、2011）は、文献（西尾、2011）とは異なる方法で東京電力および東北電力管内の6、7月の需要減少量を報告している。関西電力管内に関しては文献（村上、2011）が詳しい。文献（石丸、2011）では日本全国大での総括的な考察がなされている。

本稿では、震災後から9月末日までの東電・東北電管内における各日・各時刻の節電量を推定する。需要減少量には、工場の生産量低下の影響が含まれることから、本稿では、需要減少量から「生産量低下による減少分」を差し引いた量を「節電対策による減少分（＝節電量）」と定義した（3.1節で後述する）。また、震災後、大規模節電の必要性から、生産活動の休日シフトが提案されており、その効果を確認するために、平日だけでなく休日の節電量にも着眼した。

需要減少量を推定するには、震災前の需要実績データから震災後のベースライン需要（震災の影響が無かった場合に生じたであろう需要）を推定する必要がある。今夏の節電行動を需要データから推測するには精度良くベースライン需要を推定することが望まれる。本稿では気温の多項式¹とIIP（鉱工業生産指数）の多項式、年周期の三角関数値を説明変数に持つ統計モデルを用いてベースライン需要を推定する。この統計モデルは先行調査で用いられているものに比べて高い自由度を持つので、推定精度の向上が期待できる。高い自由度の統計モデルではオーバーフィッティング²が懸念されるが、本稿ではAIC（Akaike Information Criterion: 赤池情報量規準）に基づき自由度を最適化しており、統計モデルの自由度と推定結果の信頼性を両立する。

章立ては、2章が分析に用いた統計モデルの説明、3章が分析結果とその考察、4章がまとめと今後の課題である。

¹ 気温の多項式は、ある気温以上になると需要が急激に上昇するといった気温と需要の非線形な関係を表現できる。

² 震災前の需要に対する説明能力が増加する一方で、震災後を推定する能力が低下すること。

2. ベースライン需要の統計モデル

この章ではベースライン需要（震災の影響が無かった場合に生じたであろう需要）を推定するための統計モデルについて説明する。統計モデルの説明変数としては、気温、年周期変数³、鉱工業生産指数（IIP）を用いる。各説明変数の多項式またはフーリエ級数（三角関数）で需要との関係を表す。震災以降の需要減少量には、企業・家庭の節電効果だけでなく、工場の被災やサプライチェーンの寸断による工場の生産量低下の影響が含まれており、製造業の生産活動の指標である IIP を説明変数に加えることで、統計モデル内で「節電量」と「生産量低下による需要減少量」を分離できる。

本稿の統計モデルは、時間帯別、曜日別に合計168個の線形回帰モデルを作成する。各回帰モデルの標本データの需要傾向は異なるので、AIC（Akaike Information Criterion: 赤池情報量規準）を用いたモデル選択手法で各回帰モデルの構成を自動調整する。

以下では、統計モデル、AIC を用いたモデル選択手法について説明する。推定精度については付録で述べる。

2.1. 統計モデルと説明変数

本稿では、次のような線形回帰モデルを用いる。

$$L = f_{h,w}(T, I, C; \theta_{h,w}) \quad (1)$$

$$f_{h,w}(T, I, C; \theta_{h,w}) = B_T(T; \theta^T) + B_I(I; \theta^I) + B_C(C; \theta^C) + \theta_{h,w}^0 \quad (2)$$

$$B_T(T; \theta^T) = \sum_{i=1}^{d_T} \theta_i^T T^i \quad (3)$$

$$B_I(I; \theta^I) = \sum_{i=1}^{d_I} \theta_i^I I^i \quad (4)$$

$$B_C(C; \theta^C) = \sum_{i=1}^{d_C} \theta_{2i-1}^C \sin\left(i \frac{2\pi C}{365}\right) + \theta_{2i}^C \cos\left(i \frac{2\pi C}{365}\right) \quad (5)$$

ここで L は電力需要（kWh）、 h は時間帯⁴、 w は曜日、 T は気温、 I は IIP（鉱工業生産指数）、 C は年周期変数とする。曜日は休日⁵、月、火、水、木、金、土の7種類を考える。式 (1) は時刻毎、曜日毎に合計168 (=24×7) 個の線形回帰モデル $f_{h,w}$ からなり、各モデル内では関数 B により説明変数を多項式およびフーリエ級数へ展開する。本稿では気温と IIP は多項式で、年周期変数はフーリエ級数⁶で展開する。ここで d_T 、 d_I 、 d_C を次数と呼ぶことにする。 $\theta_{h,w} = (\theta^T, \theta^I, \theta^C, \theta_0)$ は回帰モデルのパラメータ（回帰係数）であり、 $\theta_{h,w}^0$ は定数項を表している。 θ^T 、 θ^I 、 θ^C は係数ベクトルであり、ベクトルの各要素を下付き添え字 i で表している。多項式 (3)、(4) における T^i と I^i は累乗を表している。 $f_{h,w}$ は線形

³ 1月1日を1、12月31日を365とし、一日進む毎に一つずつ増える変数とする。ただし、2月29日は2月28日と同じ値とする。1年間の周期的な需要変化を表現するための変数で、例えば、同じ気温でも需要が異なることを表現することができる。

⁴ 時間帯 h は、 h 時～ $h+1$ 時の1時間を表す。

⁵ 日曜、祝日、お盆(8/12～8/16)および年末年始(12/29～12/31, 1/1～1/4)を休日とした。

⁶ 多項式と比べた場合のフーリエ級数の利点は、回帰関数が端点(1と365)で連続になる事である。

回帰モデルであり最小二乗法に基づき θ を容易に決定できる。

θ を決定する際、電力需要 L は東京電力および東北電力がホームページ上で公開しているデータを用いて、それぞれの管内全体の1時間毎の電力需要とする。気温 T は気象庁ホームページの気象統計情報における各管内の代表地点の1時間毎の気温データとする（東電管内は東京、東北電管内は仙台を代表地点とした）。IIP は各管内の経済産業局が公表している季節調整済みの月次データ（2005年基準）を用いる。

2.2. AIC を用いたモデル選択

後述の分析では、震災前のデータを用いて統計モデルを作り、震災後のベースライン需要を推定する。震災前の需要データに対する誤差を残差、震災後のベースライン需要の推定誤差を汎化誤差と呼ぶことにすれば、汎化誤差の小さい統計モデルを作ることが目的となる。しかし、震災後のベースライン需要は推定したい未知の量であり、汎化誤差は知り得ないので、代わりに残差を最小化する。本稿の統計モデルでは多項式およびフーリエ級数の次数を増やすことで、残差は単調に減少するが汎化誤差が増加するオーバーフィッティングに注意を払う必要がある。

オーバーフィッティングに対しては、AIC（Akaike Information Criterion）や BIC（Bayesian Information Criterion）等の情報量規準や交差検定法を用いることで適切な次数を選択することができる（小西、北川、2004）。この次数選択をモデル選択と呼ぶ。本稿ではモデル選択に AIC を用いる。AIC は汎化誤差の推定量であり、線形回帰モデルに対しては標本数が少ない場合の補正（Sugiura, 1978）を加えた AIC（cAIC と表記する）を利用できる。cAIC については付録を参照されたい。

cAIC を用いて気温、IIP、年周期の次数を決定すれば、汎化誤差（の推定量）がもっとも小さくなるように統計モデルを作ることができる。後述の分析では、それぞれの説明変数の次数を $0 \leq d_T \leq 8$, $0 \leq d_I \leq 3$, $0 \leq d_C \leq 20$ の整数とし、次数の組み合わせ（ d_T , d_I , d_C ）全てに対して cAIC を計算し、最小の cAIC を持つ次数の組み合わせを選択する。cAIC の計算には残差とモデルのパラメータ数が必要である。パラメータ数は $k = d_T + d_I + d_C + 2$ となる（定数項と分散の分で2を足している）。また、 $d=0$ でその説明変数を使わないことと定義すれば、説明変数自体の取捨選択も行えるが、後述する分析において $d=0$ は選ばれなかった。

3. 分析結果と考察

3.1. 節電量の定義

電力需要データ（東電：2008/1/1～2011/10/10、東北電：2008/4/1～2011/10/10）を用いて、震災後の需要減少量を分析する。分析ではまず震災前（2011/3/10まで）のデータを用いて、前述のベースライン需要の統計モデルを作成する。そして、震災後（2011/3/11から）のベースライン需要を計算し、需要実績との差を需要減少量とする。

図 1に本稿の節電量の定義を示し、以下で詳細を説明する。2011年3月を境に鉱工業生産指数 IIP は、震災の影響によって大きく低下した（図 2、3）。この変化を考慮するかどうかで、ベースライン需要は二種類考えられる（図 1の式（7）と（8）を参照）。一つは震災後の IIP の実績値をそのまま用いた場合のベースライン需要であり $L_0(I)$ と書くことにする（下付き添え字の0は推定値を表すことにする）。もう一つは、震災が無かった場合に実現したであろう IIP を用いて推定したベースライン需要であり $L_0(I_0)$ と書くことにする。この時、二つのベースライン需要の差分 $\Delta L_1=L_0(I_0)-L_0(I)$ は、生産量低下による需要減少量と解釈できる。一方、需要実績を L とし、 $\Delta L_2=L_0(I)-L$ を節電量と呼ぶことにする。ただし、本稿のモデルでは、生産量低下に節電によるものと被災によるものが含まれる。

需要減少量	$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$	(6)
生産量低下による需要減少量	$\Delta L_1 = L_0(I_0) - L_0(I)$	(7)
節電量	$\Delta L_2 = L_0(I) - L$	(8)

$L_0(I_0)$	ベースライン需要（想定 IIP）。想定 IIP（= I_0 ）を用いて推定した震災後の需要。
$L_0(I)$	ベースライン需要（実績 IIP）。実績 IIP（= I ）を用いて推定した震災後の需要。
L	需要実績
I	実績 IIP。各月の季節調整済みの鉱工業生産指数の実績値 ⁷ 。
I_0	想定 IIP。震災が起こらなかった場合に実現したであろう2011年3月以降の IIP の想定値。本稿では、震災前6ヶ月の IIP の平均値で外挿した。

図 1 節電量の定義

⁷ 執筆時点では2011年8～10月の実績 IIP が入手できなかったため、6月と7月の IIP の値の平均値で外挿した。

3.2. 震災以降の需要減少量の日変化

図 2、3に東電および東北電の各日における需要ピーク時間帯の需要実績およびベースライン需要を示す。また、同日の最高気温および当該月の IIP を示す。左側の縦軸には日最大電力（単位：百万 kW）および IIP（2005年基準、2005年=100）を示している。右側の縦軸には日最高気温（単位：℃）を示している。

表 1 は7、8月について東電および東北電の2010年と2011年で、ピーク日の日最大需要および日最大需要の平均値、ピーク時ベースライン需要、ピーク時の需要減少量の平均値の比較結果を示している。東電について2010年と2011年を比較すると、日最大需要は1016万 kW、ピーク時 L_0 (I_0) は204万 kW、最高気温は1.4℃の差がある。すなわち、2011年は前年に比べて日最大需要実績が1016万 kW 減少しており、そのうち204万 kW は日最高気温の平均が1.4度減少した効果であり、残りが震災影響によるものと解釈できる。2011年の需要減少量 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ は同年の L_0 (I_0) に対して15.6%であり、すなわち気温影響を考慮しても15.6%の需要減少（ピーク時）が確認できる。同様に東北電について2010年と2011年を比較すると、最大需要は245万 kW、 L_0 (I_0) は70万 kW、最高気温は1.7℃の差がある。2011年の需要減少量 ΔL は同年の L_0 (I_0) に対して15.3%である。計算条件が異なるため、先行調査との単純な比較は難しいが、例えば、計算条件がもっとも近い文献（石丸康宏、2011）と比較すると表 1は類似の結果を与えている⁸。

図 4、5に平日、休日の5時と14時における需要減少量の時間推移を示す。各点は算出した需要減少量を示している。グラフからわかるように算出した需要減少量にはばらつきがある。このばらつきは、曜日や気温による需要減少量の変化の他に推定誤差が含まれる。この推定誤差は平滑化曲線を用いることで緩和することができる（ただし、曜日や気温による変化も平均化されてしまう）。図中の曲線は各点の需要減少量に対して前後4点の需要減少量を考慮した9点の平均による平滑化曲線である。端点より以前あるいは以降の値については、端点の値で外挿することで平滑化曲線を描いた。

グラフより東電の平日14時では6月下旬から8月下旬にかけて需要減少量が増加していることが確認できる。一方、東北電では、平日14時では6月下旬から8月下旬にかけて需要の減少が確認できるが、東電に比べると減少量のばらつきが大きいようである。東電、東北電ともに10月に入っても需要減少が確認でき、節電活動の継続が表れていると考えられる。

図 6に節電率の推移を示す。節電率は節電量を L_0 (I_0) で割ったものである。東電、東北電において、平日14時の節電率が使用制限期間中は高く、それに比べて平日5時や休日の節電率は低いことがわかる。これより、平日のピーク時間帯での節電が積極的に行われたことがわかる。また、東電の平日5時、休日5時の節電率は7月以降ほぼ同レベルで推移しているのに対して、東北電では平日5時、休日5時の節電率は7月以降減少しており、東北電で

⁸ ただし、文献（石丸康宏、2011）では東電の気温要因を254万 kW と見積もっているが、本稿では204万 kW であり、大きな差がある。統計モデルの差異によるものも含まれるが、主には日最大需要平均の2010年と2011年での差が本稿では1016万 kW であるのに対して、文献（石丸康宏、2011）では1057万 kW であることが主な要因に思われる。

は夜間の節電率が減少したことが分かる。東北電の夜間の節電率の減少の要因としては、季節変動によるものの他にも、企業活動のオフピーク時間帯へのシフト等の可能性が考えられる。

自動車業界で稼働日を木金から土日へシフトした効果を調べるために、6月と7月の日単位のピーク時の節電率を図 7に示す。背景の青色は木曜と金曜を示している。東北電では木、金曜の節電率が他の平日に比べて大きいことがわかる。一方、東電では他の平日でも節電率が増加しており、稼働日のシフトによる節電の割合は東北電に比べると小さいようである。

表 1 ピーク時間帯での2010年と2011年の7,8月の平均量の比較
(需要等：万 kW、気温：℃)

年		東京			東北		
		2010年	2011年	差分	2010年	2011年	差分
ピーク日の日最大需要		5999	4922	-1077	1557	1247	-310
平均	日最大需要(実績)	5109	4093	-1016	1306	1061	-245
	ピーク時ベースライン需要 (想定 IIP) L_0 (I_0)	5051	4847	-204	1285	1252	-33
	ピーク時ベースライン需要 (実績 IIP) L_0 (I)	5051	4815	-236	1285	1215	-70
	生産量低下による需要減 ΔL_1	-	32		-	37	
	節電量 ΔL_2	-	722		-	154	
	日最高気温	31.9	30.5	-1.4	29.8	28.2	-1.6

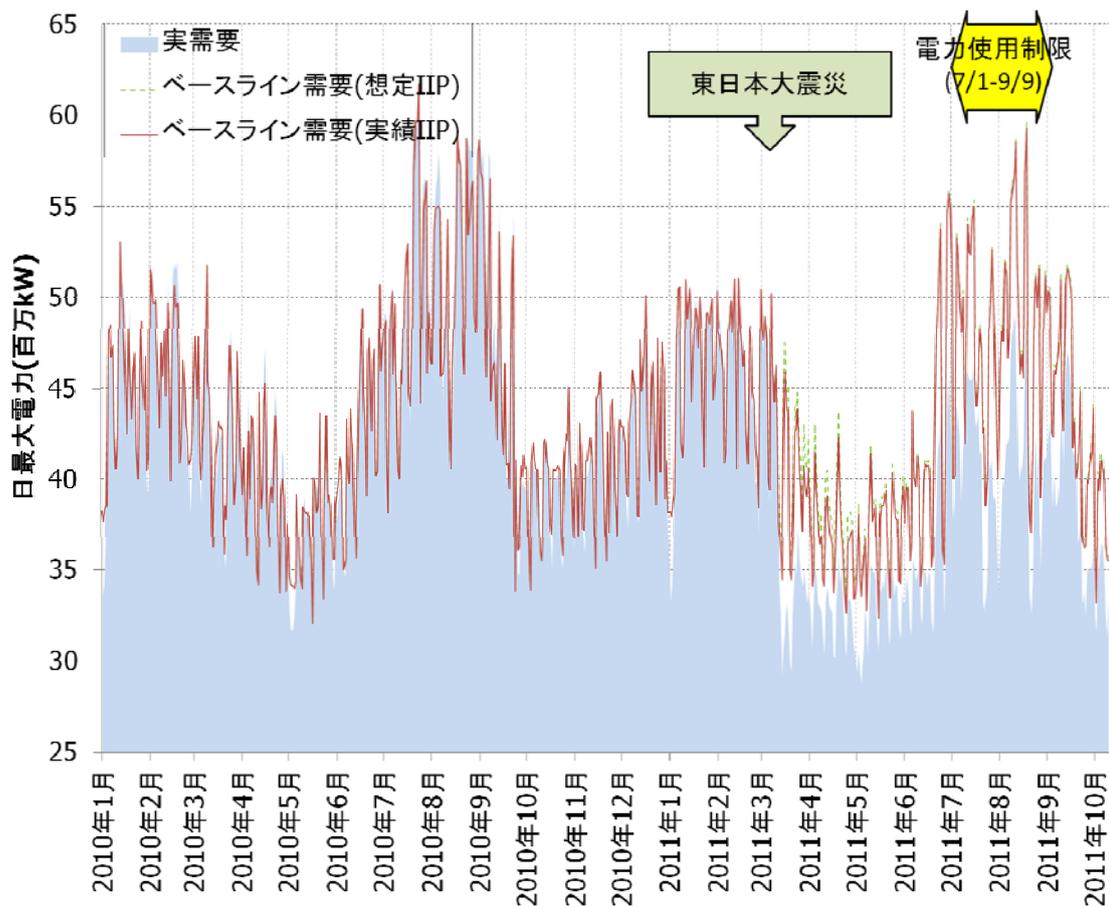
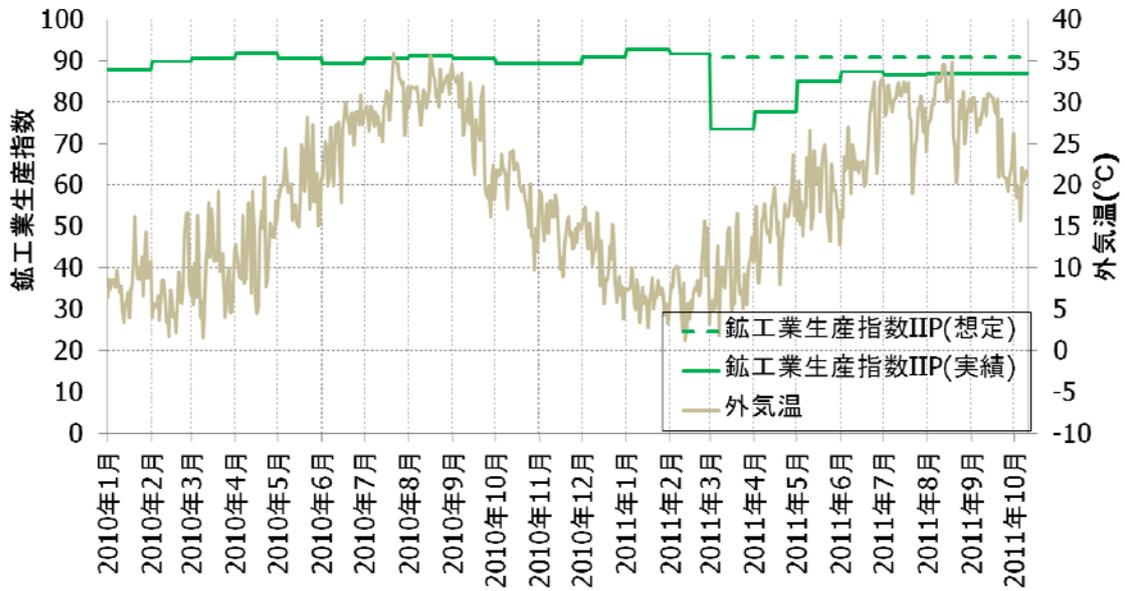


図 2 気温、IIP、日最大需要とベースラインの推移 (2010/1/1~2011/9/30) (東電)

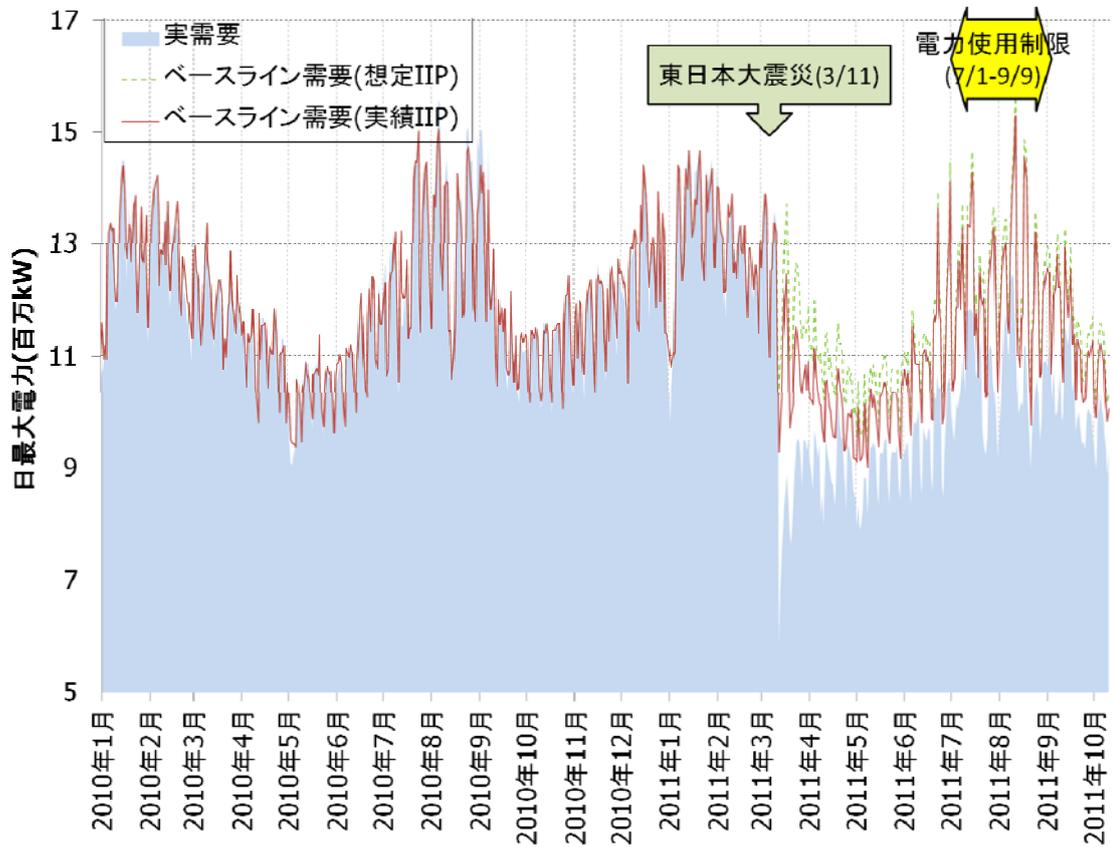
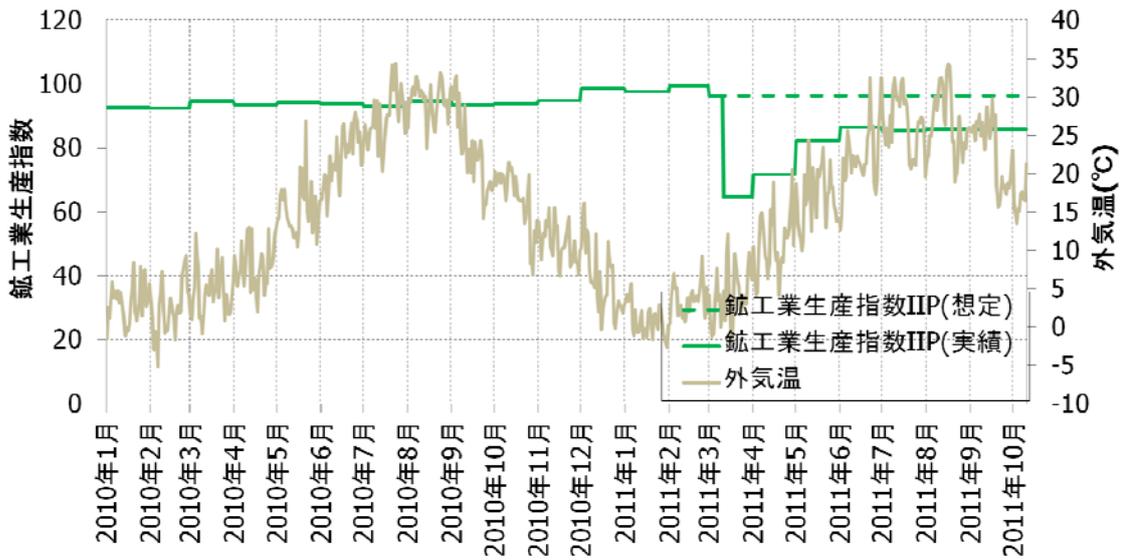
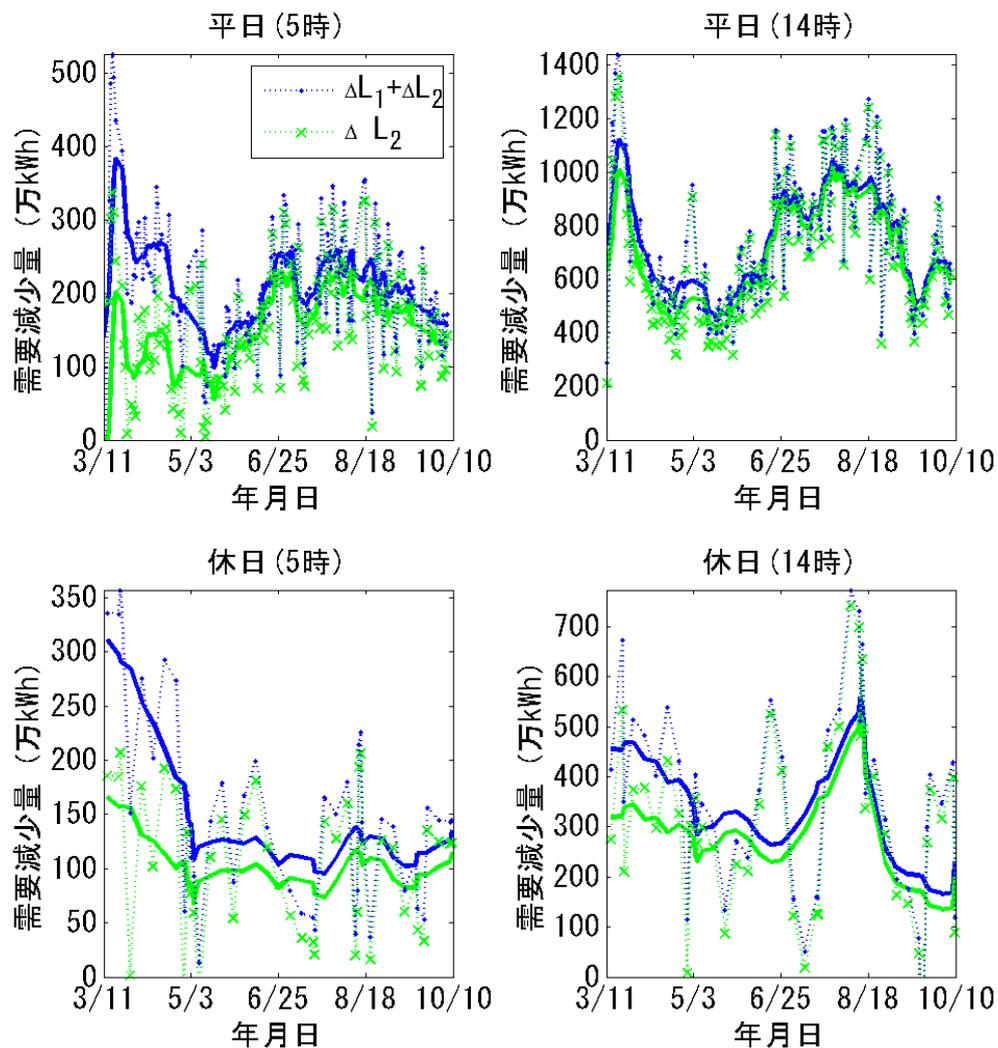
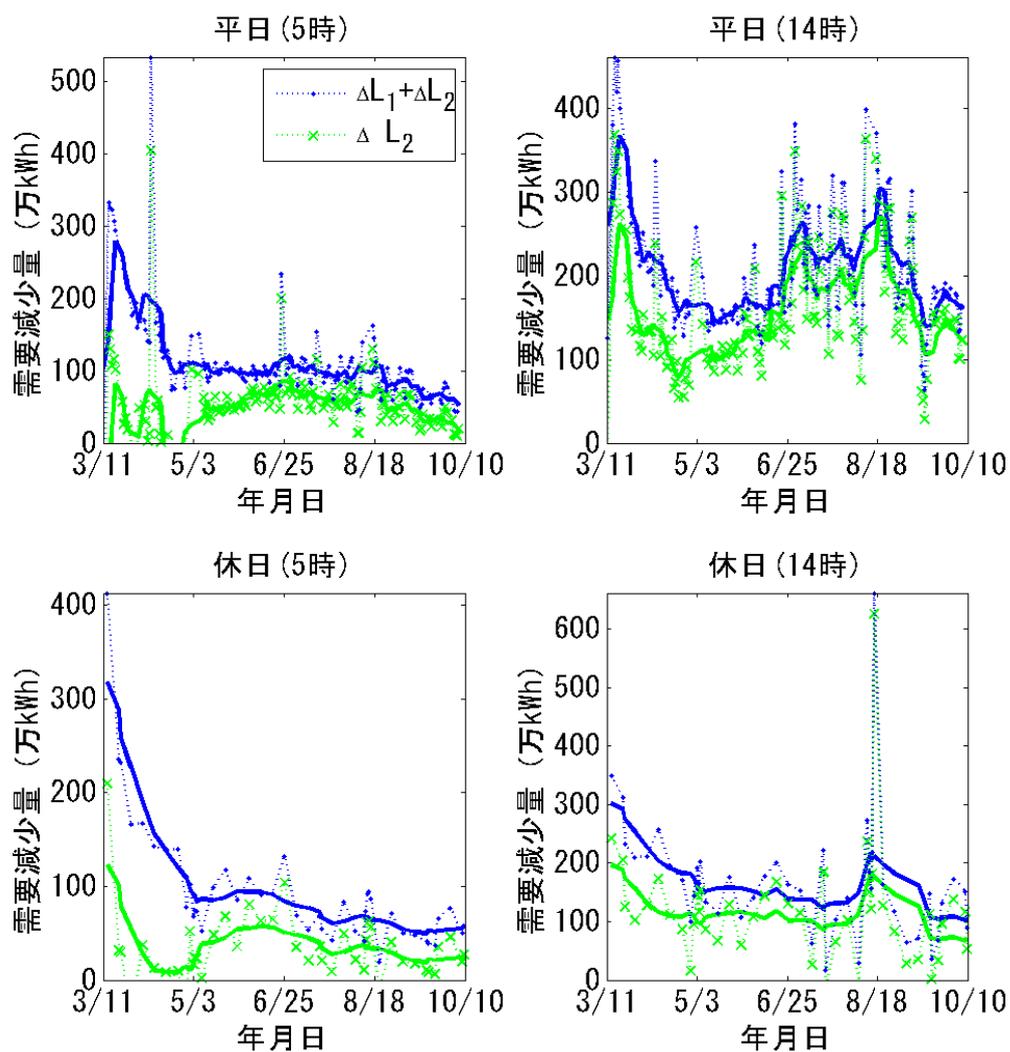


図 3 気温、IIP、日最大需要と需要減少量の推移 (2010/1/1~2011/9/30) (東北電)



(ΔL_1 :生産量低下による需要減、 ΔL_2 :節電量)

図 4 需要減少量の推移 (2011/3/11~2011/9/30) (5時、14時/平日、休日) (東電)



(ΔL_1 :生産量低下による需要減、 ΔL_2 :節電量)

図 5 需要減少量の推移 (2011/3/11~2011/10/10) (5時、14時/平日、休日) (東北電)

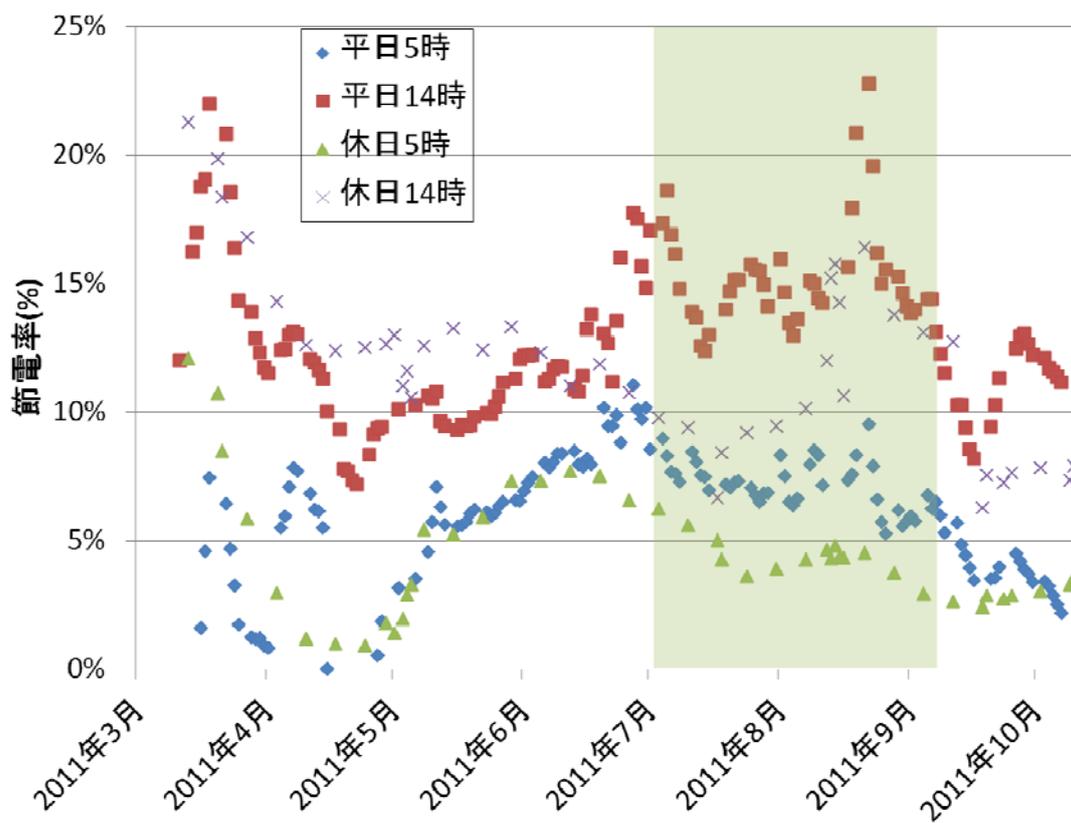
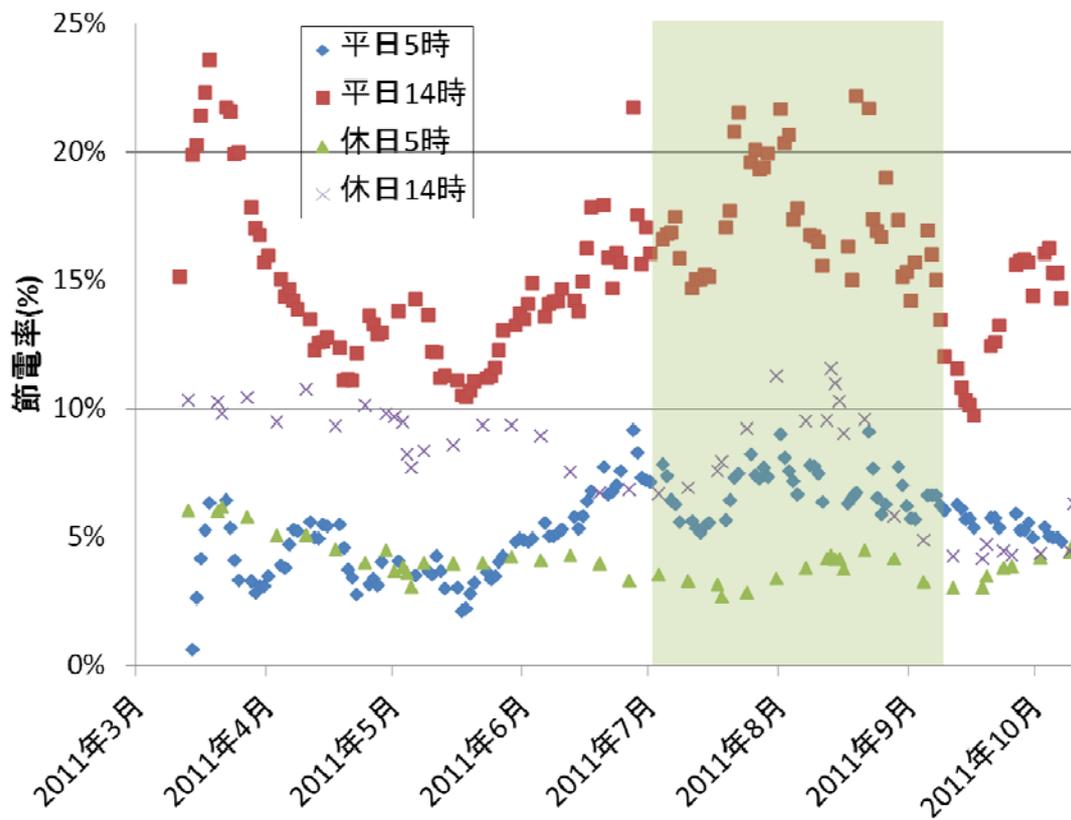
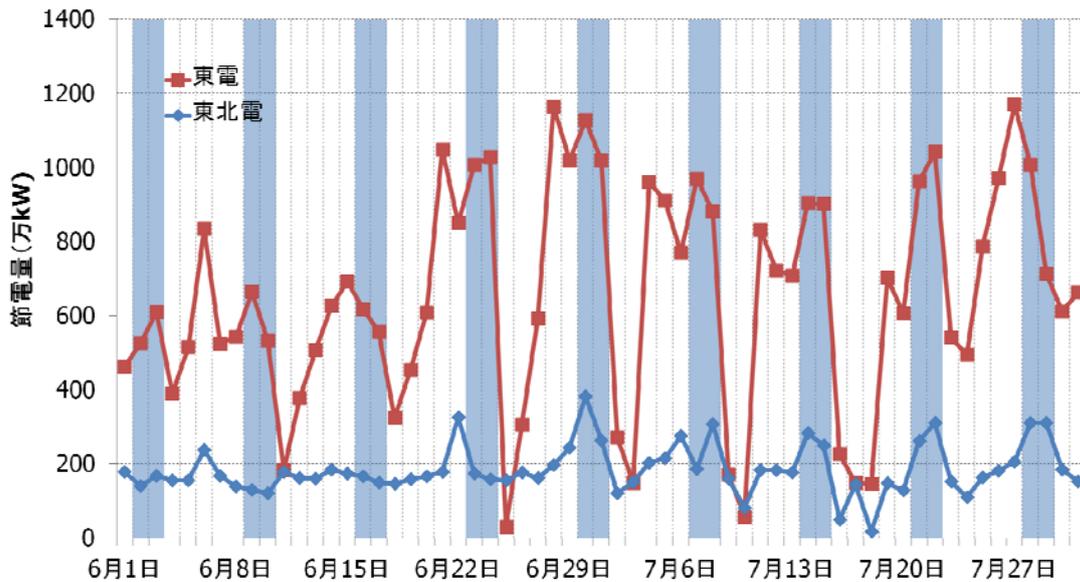


図 6 節電率の推移 (上：東電、下：東北電)



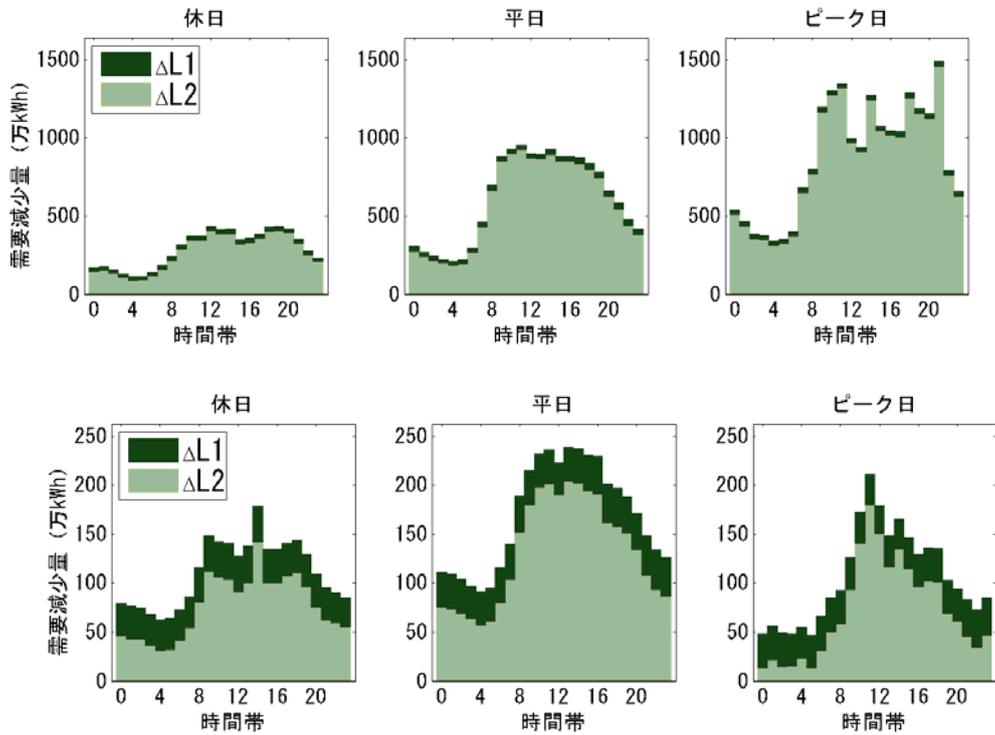
※背景の色は木、金曜日を示している

図 7 2011年6月と7月の節電量の推移

3.3. 時間帯別・曜日別の需要減少量の傾向

図 8に東電および東北電の7、8月の需要減少量を時間帯別に示す。休日、平日、およびピーク日（最大需要が発生した日：東電で8月18日、東北電で8月9日）の三ケースを示している。図より東電管内では平日の昼間の節電量は大きく変化しないことがわかる。ピーク日には12～21時の間で需要減少量がばらついている。この原因は、この日は気温が時間単位で大きく変化したのに対して、需要実績があまり変化していないことによる。本稿の分析では気温変化に対する需要反応速度を陽に考慮していないため、これらが推定誤差によるものなのか、今夏は気温に対する需要反応速度が変化したのか、現時点では区別できない。一方、東北電では生産量低下による需要減少量の割合が東電に比べて大きく、平日昼間の時間帯における節電量の変化率が東電に比べて大きい。

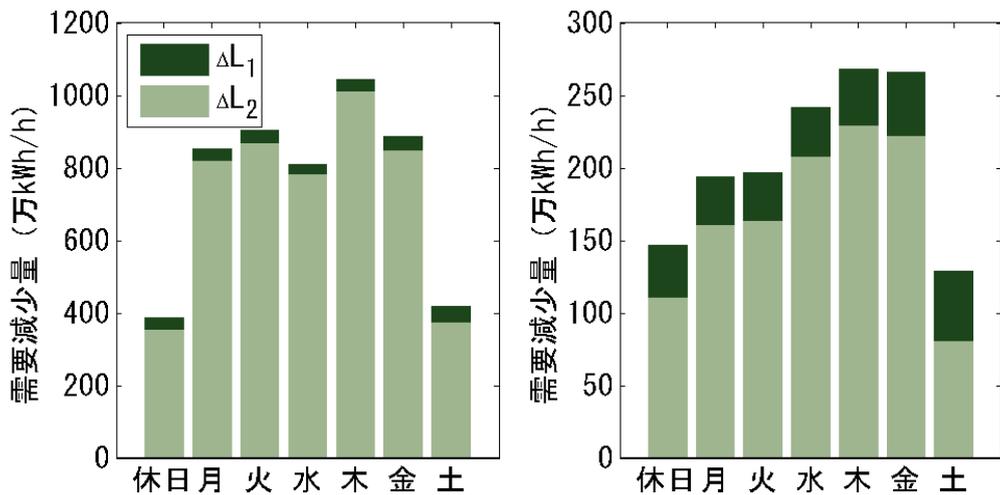
図 9に東電および東北電の7、8月におけるピーク時間帯（13～16時）の曜日毎の1時間あたりの平均需要減少量を示す。東電、東北電力管内では、木曜の節電量が多い点で共通している。平日に着目し各曜日の比率に着目すると、東電の方が曜日間の差異が小さい。



($\Delta L1$:生産量低下による需要減、 $\Delta L2$:節電量)

図 8 7-8月の需要減少量の時間変化

(左：平日、中央：休日、右：ピーク日) (上：東電、下：東北電)



($\Delta L1$:生産量低下による需要減、 $\Delta L2$:節電量)

図 9 7-8月の需要減少量の曜日変化 (左：東電、右：東北電)

3.4. 節電量の気温依存性

東電および東北電の2011年6月1日から2011年9月30日の期間における平日14時（お盆除く）の、節電量（ ΔL_2 ）と気温の関係を図 10に示す。図の曲線は2次多項式による近似曲線である。休日については、節電量のばらつきに対してデータ数が十分ではないため、傾向を分析するに至らなかった。

東電および東北電において、いずれの時間帯に対しても（気温20℃以上では）気温の上昇とともに節電量が増加する傾向にあることがわかる。これは震災前および震災後の気温感応度の差として解釈することができ、冷房需要における節電の効果と解釈できる。表 2に平日14時の25～35℃の気温帯を1℃毎に区切り、各帯域の平均気温および平均節電量を示す。この表の結果の線形近似から、平日14時における1℃上昇あたりの節電量の増加量を算出すると、東電では53万 kW/℃、東北電では19万 kW/℃となる。すなわち、2010年夏と比べると、2011年夏の気温感応度はこれだけ減少したと解釈できる。

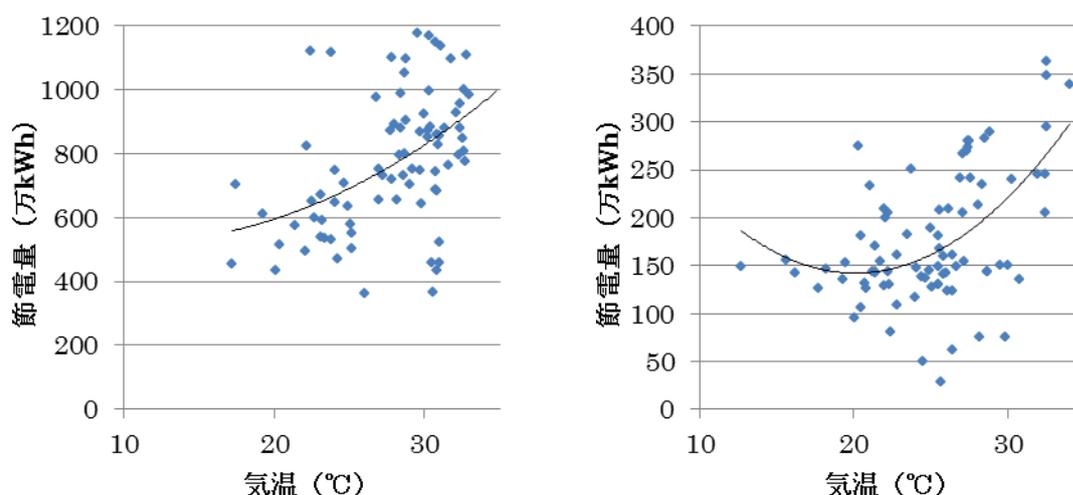


図 10 平日の14時における節電量の気温感応関数（左：東電、右：東北電）

表 2 平日14～15時間帯の気温別需要減少量（気温：℃、節電量：万 kWh）

	気温	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
節電量	東電	545	669	805	879	816	793	816	900	985	1242
	東北電	146	151	246	197	113	175	-	292	-	339

4. まとめ

本稿では、震災後から9月末日までの東電・東北電管内における各日・各時刻の節電量を推定した。ベースライン需要（震災影響が無かった場合に生じたであろう需要）を推定するために、気温の多項式と鉱工業生産指数の多項式、年周期の三角関数値を説明変数とする統計モデルを考え、多項式の次数や三角関数の周期を AIC（Akaike Information Criterion）により自動最適化することで、オーバーフィッティングを回避した自由度の高い統計モデルを構築した。分析結果から以下のことが分かった。

- 東電管内では、2011年は前年に比べて日最大需要（実績平均）が1016万 kW 減少しており、そのうち204万 kW は日最高気温の平均が前年より1.4℃減少した効果であり、残りが震災影響による。気温影響を除外してもピーク需要は15.6%減少した。同様に東北電管内では日最大需要が245万 kW 減少し、そのうち70万 kW は日最高気温の平均が1.7℃減少した効果である。気温影響を除外してもピーク需要は15.3%減少した。また、東北電管内の需要減（245万 kW）に対して生産量低下による需要減（37万 kW）が占める割合は15%と、東電管内の同割合（3%）に比べて大きい。
- 7-8月の曜日毎の13-16時の需要減少量を見ると、東電・東北電管内共に、木曜が多い。平日のみに着目すると、東電管内では曜日間の差異が小さい。一方、東北電管内では木金の節電率が他の平日に比べて大きい。自動車業界で稼働日を木金から土日へシフトした効果だと考えられる。
- 両管内共に、ピーク時間帯である平日14時の節電率が使用制限期間中は高く、それに比べてオフピーク時間帯である平日5時や休日の節電率は低い。平日のピーク時間帯での節電が積極的に行われたことが分かる。また、東電管内のオフピーク時間帯の節電率は7月以降同水準で推移したが、東北電管内では、平日5時、休日5時の節電率は7月以降減少しており、夜間需要が増加したことが分かる。
- 前年と比べると、2011年夏の気温感応度（平日14時）は、東電管内では53万 kW/℃、東北電管内では19万 kW/℃減少した。冷房需要における節電の効果と解釈できる。

今夏の社会で起きた節電行動がどのようなものであったかという社会科学的な関心に対しては、需要データを統計的に分析することが有効な方法の一つである。需要データから多くの情報を引き出すには、ベースライン需要推定手法の精度を高める必要がある。先行調査では比較的簡易な分析手法が用いられているが、本稿では、統計学においてコンセンサスが十分に得られている AIC と多項式を組み合わせた手法を用いた。やや複雑な分析手法であるが、本稿の統計モデルおよびその拡張を検討する価値があると著者は考える。統計モデルを用いた分析事例を示すことで、節電結果の速報を提供するとともに、今後同様の分析を行う者の一助になることを期待する。付録 B に同様の分析を行う場合の注意点を示している。

参考文献

- 資源エネルギー庁、2011；夏の電力需給対策の総括、
<http://www.meti.go.jp/press/2011/09/20110907007/20110907007-5.pdf>
- 西尾健一郎、2011；節電は進んでいるのか？～東京電力管内における需要減少量の試算～、（財）電力中央研究所 社会経済研究所 ディスカッションペーパー
- 永富悠、2011；東京電力管内および東北電力管内における気温影響を考慮した節電効果に関する試算、日本エネルギー経済研究所
- 村上一真、稲田義久、島章弘、2011；関西電力・東京電力管内における今夏の節電等の電力需要抑制効果と関西電力管内の今冬・来夏の電力需給見通し、関西経済研究所 KISER 政策レポート
- 石丸康宏、2011；「日本経済と電力問題」アップデート～“一億総節電”の夏を振り返る～、三菱東京 UFJ 銀行
- 鉱工業生産指数データ、経済産業省、
関東経済産業局、<http://www.kanto.meti.go.jp/tokei/kokogyo/20111017index.html>、
経済産業省東北経済産業局、http://www.tohoku.meti.go.jp/cyosa/tokei/tokei_data.html#iip
- 気象庁、気象統計情報、<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 電力需要データ、
東京電力、<http://www.tepco.co.jp/forecast/html/download-j.html>
東北電力、<http://setsuden.tohoku-epco.co.jp/download.html>
- 小西貞則、北川源四郎、2004；情報量規準、朝倉書店特殊
- Nariaki Sugiura, 1978; Further analysts of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 7 (1) , pp. 13-26 (1978) .
- 灰田武史、2009；日種別・日射量を考慮した時刻別回帰型トレンド調整項付き需要モデリングによる電力ロードカーブ予測手法、電気学会論文誌 B 部門、Vol 129, No. 12、pp. 1477-1485. (2009)

付録

A. 推定誤差

ベースライン需要の推定値の誤差について説明する。誤差には震災前の需要実績の説明度合である残差と、震災後のベースライン需要がどの程度推定できているかの指標である汎化誤差がある。分析においては汎化誤差に注意を払う必要があるが、真のベースライン需要は不明であるから、ベースライン需要の推定精度を直接知ることはできない。

そこで、2010年3月10日までを回帰用データとし、2010年3月11日から2011年3月10日をテスト用データとすることで、残差と汎化誤差（の推定値）を算出する。図 11に一時間帯当

たりの各誤差の標準偏差を曜日別、時間帯別に示す。

東電では曜日別にみると休日の汎化誤差が大きく、時間帯別にみると12時前後の誤差が大きい。需要の大きさに応じて誤差が増加する傾向にあり、休日は推定が難しいことがわかる。一方、東北電では曜日別に見ると、火曜の汎化誤差が顕著に大きい。この原因は、7,8月の火曜日に着目した際に、回帰用データにおける最高気温を超える日（時間帯）が、テスト用データに多数含まれていたことによる。このような場合の推定値は外挿として得られ、多項式による外挿では付録 B で後述するルンゲ現象によって、大きな誤差が生じる。後述する分析では推定値は外挿ではなく内挿となるので、このような誤差は生じない。

全曜日、全時間帯に対して汎化誤差の絶対値の中央値⁹は、東電では82万 kWh、東北では22万 kWh であり、節電量の傾向を分析する上で十分な精度がある。

B. 気温の多項式回帰とルンゲ現象

気温の多項式（と定数項）だけで需要を回帰した場合の結果を図 12に示す。図は、震災前（東電：2008年1月1日～2011年3月10日、東北電：2008年4月1日～2011年3月10日）と震災後（2011年3月11～2011年10月10日）の平日14～15時間帯の需要と気温の関係および、震災前のデータに対して多項式で回帰した場合の回帰曲線を示している。多項式の次数はcAICで決定し、次数はそれぞれ東電で6次、東北電で9次である。図より多項式は十分な説明能力を持っていることがわかる。しかし、東北電力の0度付近および30度付近では期待に反する回帰結果となっている。これはルンゲ現象と呼ばれ、高次の多項式では、データの端の領域（気温0度と30度付近）は回帰曲線が不安定になりやすい。

気温を説明変数とする需要の回帰分析に関しては、いくつかの方法が考えられる。例えば、文献（西尾、2011）では区分多項式が用いられている（多項式は1次多項式のみ）。区分多項式は説明変数空間を複数の区間に分割することで高次の多項式の使用を避け、ルンゲ現象を抑制できる点で優れている。文献（灰田、2009）では放射基底関数（RBF: Radial Basis Function）ネットワークが検討されている。区分多項式は区分境界で不連続な関数となるが、RBF はガウス関数による重み付けにより不連続性を回避できる。また、この不連続性を回避する別の方法としてはスプラインのように関数が連続となるような制約を入れる方法がある。

区分多項式や RBF ネットワークはルンゲ現象を抑制するのに有効だが、区分多項式やスプラインの区分や、RBF におけるガウス基底関数のパラメータを簡素にかつ客観的に設定する技術は十分に確立されていない。これに対して多項式は次数選択が容易である点で優れている。また、震災後の各データの気温が震災前のデータの気温分布の内側にあることから、今回の分析ではルンゲ現象を無視できると考えられる。

⁹ 中央値は平均値に比べて外れ値の影響を受けにくい。ルンゲ現象による誤差や、予測の難しい特異な日も含まれているため、典型的な誤差値として中央値の値を参照する。

C. cAIC

cAIC は対数尤度 L に対して次のように与えられる。

$$cAIC = -2 \ln L + \frac{2kn}{n-k-1}$$

ただし、 n を標本数、 k をモデルのパラメータ数（線形回帰モデルのパラメータ数に一を加えたもの）とする。線形回帰モデルの対数尤度は、線形回帰モデルを次のような確率モデルと考えることで算出される。

$$p(y, x | w, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{(y - \langle x, w \rangle)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

ただし、 w を線形回帰モデルのパラメータ、 σ を正規分布の標準偏差パラメータ、 $\langle x, w \rangle$ をベクトル x と w の内積とする。この確率モデルの最尤推定は、線形回帰モデルにおける二乗誤差（残差）の最小化と等しく、また最小化した二乗誤差の平均値が分散 σ^2 となる。

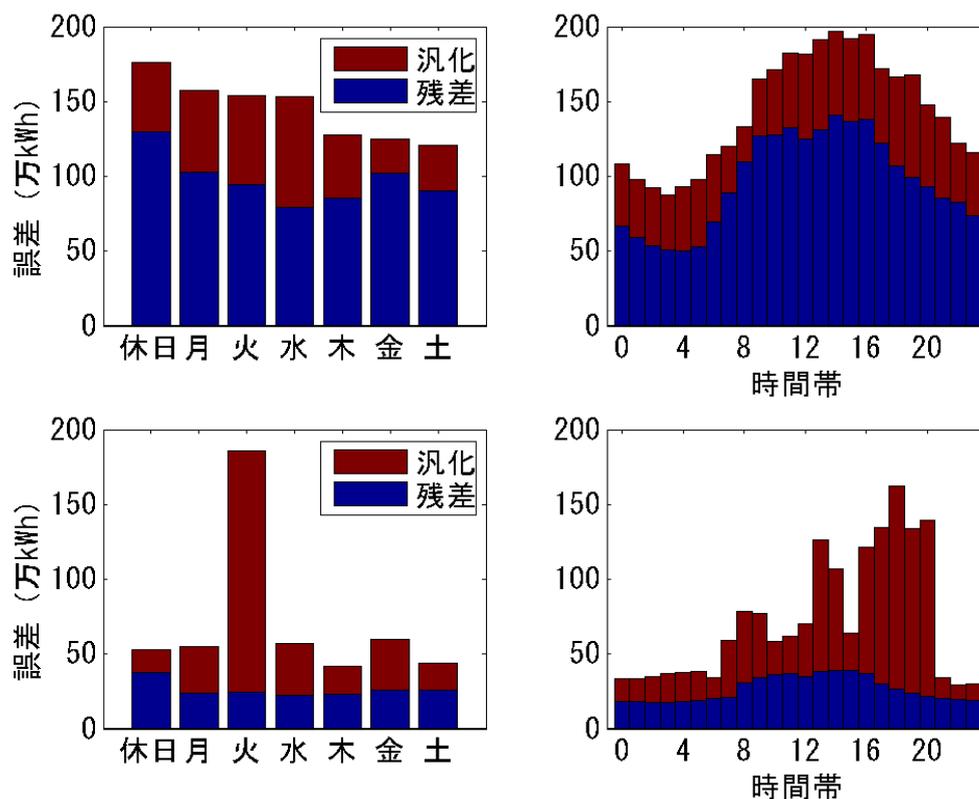


図 11 推定誤差（上：東電、下、東北電）

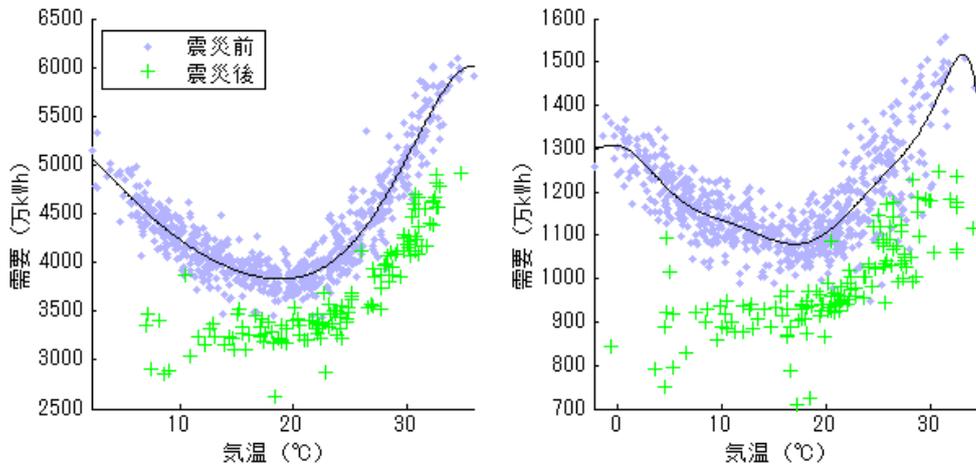


図 12 需要の気温依存性に関する多項式回帰モデル (左：東電、右：東北電)