

民生部門における将来の家庭用電力需要と省エネルギーの限界:浦安市の場合

FUTURE PROSPECT OF ELECTRICITY DEMAND AND LIMITS TO ENERGY SAVING BY THE DOMESTIC HOUSEHOLD SECTOR : THE CASE OF URAYASU CITY

大西 輝明¹・島野 圭司²・岡田 修身³

¹博士 (理学) 科学技術社会研究所理事 (E-mail:ohnishiteruaki@yahoo.co.jp)

²修士 (工学) 温暖化防止うらやす (Email:kejishimano@k4.dion.ne.jp)

³博士 (工学) 科学技術社会研究所理事 (Email:okadaomk@pb3.so-net.ne.jp)

浦安市を例にとり、民生家庭部門における電気使用量の将来予測を行った。家庭での電力需要は大型の家電機器類と照明機器およびその他の機器の使用によるとし、これらによる将来の需要量を学習曲線などを用いてボトムアップ方式で推定した。また各家庭での節電行動や市民への働きかけがもたらす省エネ効果の程度についても推算した。2030年度での家電機器利用に起源する電力需要の最大可能削減量は2013年度比で~17%、家庭での省エネ努力による削減量も加味すれば最大30~40%の程度となることがわかった。

キーワード : 民生家庭部門、電力需要、将来予測、省エネルギー、浦安市

1. はじめに

我が国の一次エネルギーのうち29%は民生部門において消費され、そのうちの55%は家庭部門で消費されている。電気エネルギーに関してのこれらの割合はそれぞれ57%および51%である。¹⁾ 我が国では西暦2030年度までに、2013年度比の74%までのCO₂排出量削減を目標としており、家庭部門では60%までの省エネルギー(省エネ)も可能であるとしている。²⁾ これに鑑みれば、家庭部門での省エネ努力の高揚は、今後ますます要請される場所である。しかし実際に家庭部門では将来、どれほどまでにエネルギー消費削減が可能なのかについての具体的検討は少ない。当報文では千葉県浦安市を例にとり、浦安市民のエネルギー利用、特に電気エネルギー利用量の将来予測をボトムアップ方式で行い、省エネ程度の限界を検討する。当報文での方法論は、浦安市と類似の都市形態や類似のエネルギー消費傾向を持つ諸都市に適用可能である。

東京都江戸川区の南東に隣接する浦安市の近年の人口はほぼ一定で約163000人、74000世帯であり、今後も大きな変化はないとみられる。現在の世帯当たりの人数は2.2人、65歳以上の人口割合は18.7%、

14歳以下は15.2%である。1975年に第一期の、1980年に第二期の埋立事業がそれぞれ終了して大規模な住宅地として開放された結果、現在の市内には共同住宅53000戸、一戸建てなど15500戸、全住宅に占める共同住宅割合は約77%の状態となっている。この共同住宅割合は東京23区が74%、千葉県平均が44%であることに比すれば、きわめて高い値となっている。浦安市の第一期、第二期埋立地におけるこうした共同住宅の平均延べ面積はそれぞれ94.4m²/戸、および127.7m²/戸である。^{3,4)}

Fig.1に1970年以降の浦安市民1人当たりの電気、都市ガス、および水道利用に基づくCO₂排出量の経年変化を示す。³⁾ 行政や企業が家庭用に配布する環境家計簿では、このような資源の使用量を記録する。都市ガス、水道についての浦安市民の使用量は、過去30年以上にわたってほぼ一定であった。しかし電気使用量は時代とともにしだいに上昇し、2010年近傍からは上昇率が鈍り安定化の兆しもうかがえるものの、今後の動向は明らかではない。従って、家庭部門での省エネ対象のひとつが今後の電気使用量の削減にあることは明らかである。

以下第2章では代表的な家電機器の電気使用量経年変化を求め、それを用いてこれらの機器以外に

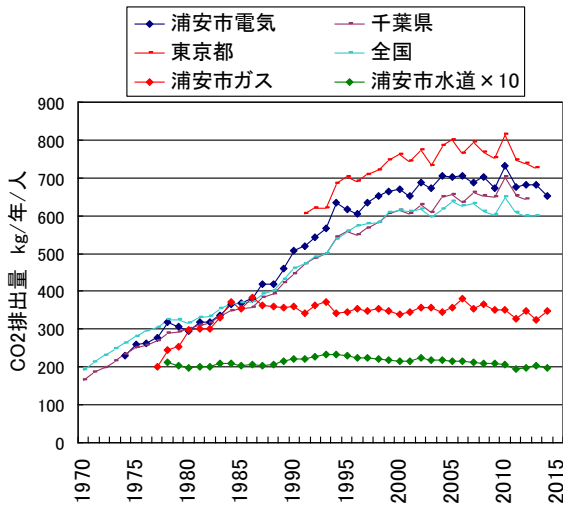


Fig.1 浦安市民のエネルギー源別 CO₂ 排出量原単位経年変化(電気エネルギーは他地域分も比較のため表示)

よる電気使用量の経年変化状況を求める。こうして求めた電気使用量は照明機器やその他の機器によるものであるとして、第3章では照明機器がLEDに置換する場合の将来の電気使用量を算出し、それによる省エネ程度を推算する。第4章では家庭レベルでの種々の節電行動による省エネ効果を検討する。当報文での「浦安市」とは、浦安市の統計量や設定値が利用できる場合にはそれらを用い、それらが存在しない場合には千葉県値、東京都値、南関東値、さらに全国平均値を順次、採用したものをさすとする。また、電気使用量単位はMWh/年/人とする。

2. 家電機器による電気使用量の経年変化

Fig.1 に示した「電気」のCO₂ 排出量曲線は電気使用量に比例する。ここでは種別ごとの家電機器の年間電気使用量を重畳すれば、Fig.1 から得られる電気使用量の経年変化曲線となることを利用して、浦安市民一人当たりが保有する各機器の数およびエネルギー効率の経年変化の様相を既存の関数を用いて表す。そうした関数を将来の方向へ外挿することで、2015年以降の電気使用量を推定する。以下では便宜的に家電機器を、(i) 大型家電機器(単に「家電機器」と呼ぶ)、および(ii) 照明機器やコンセント利用の小型機器類(これらを以下では「照明機器」および「その他の機器」と呼ぶ)とに大別する。当章では(i)の家電機器について検討する。こうした検討のために利用できる家電機器の公表統計量はス

トックの数量^{5,6)} ストックのエネルギー利用率⁵⁾ などである。上述の経年変化様相を表現する関数の算出のためには、特定の年次での購入数やその年次で購入された機器の効率などが必要となるが、ストック値はこれらに対応するものではない。ここでストックとは任意の時点で浦安の各家庭が保有する機器をさし、これは当該年以前において購入されてきた機器の重量であることに注意する必要がある。以下では時間を年単位で与える。

いま n 種類の家電機器 i ($i=1, \dots, n$) がある場合、任意の年次 t における一人あたりの年間電気使用量 $U(t)$ は以下の式で与えられる。

$$U(t) \equiv \sum_{i=1}^n U_i(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{t'=0}^t w_i(t') T_i(t) N_i(t; t') \quad (1)$$

ここで t' は機器 i の購入年、 $w_i(t')$ は一台の機器 i が一定のパフォーマンスを実行するために必要とする電力量^{7,8)} $T_i(t)$ は年間利用時間^{7,8)} $N_i(t; t')$ は時刻 t' において購入した i が t において残存する数量である。量 $U(t)$ の算出には $t' \leq t$ におけるこれらの情報が必要となる。

式(1)での残存数 $N_i(t; t')$ の t' に関する和は、時刻 t での機器 i の保有数(ストック数) $S_i(t)$ となる。数量 $S_i(t)$ は各個人が新規または買替えて購入する数量 $I_i(t')$ を用いて、以下のように与えられる。

$$S_i(t) = \sum_{t'=0}^t N_i(t; t') = \sum_{t'=0}^t I_i(t') \Phi_i(t; t') \quad (2)$$

ここで $\Phi_i(t; t')$ は機器 i の残存率であり、参考文献⁹⁾ に従って t と t' に関する Weibull 分布で与えられるとし、簡単のため以下の指数 β は i には依らず一定 ($\beta=3.5$) であるとしよう。すなわち

$$\Phi_i(t; t') = \exp\{-\alpha_i(t-t')^\beta\} \equiv \exp\{-\alpha_i \Delta^\beta\} \quad (3)$$

機器 i の平均寿命(または平均買替え時間)は既知^{5,6,10)} で、 τ_i とする場合

$$\tau_i = \int_{\Delta=0}^{\infty} \Delta \cdot \Phi_i(t; t') d\Delta / \int_0^{\infty} \Phi_i(t; t') d\Delta \quad (4)$$

従って定数 α は以下の式で与えられる。

$$\alpha_i = [\Gamma(2/\beta) / \{\tau_i \Gamma(1/\beta)\}]^\beta \cong 10.9 \tau_i^{-3.5} \quad (5)$$

ここで $\Gamma(x)$ はガンマ関数である。

数量 $I_i(t')$ は式(2)から、保有数⁶⁾ $S_i(t)$ を与えて算出する。 $S_i(t)$ が連続関数として与えられる場合には、 $I_i(t')$ は式(2)を第一種のVolterra型積分方程式として解き、 t' の連続関数として算出することができる

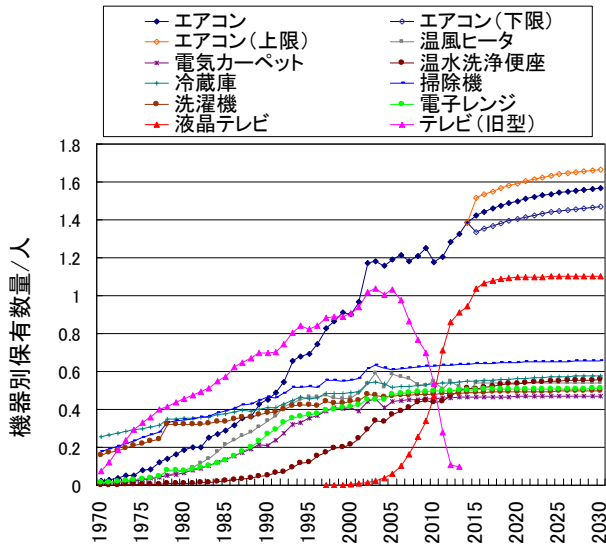


Fig.2 浦安市民が保有する家電機器数量の経年変化（エアコン上下限値は χ^{*2} がその最小値から10%以内にある範囲を表す）

が、ここでは離散的に式(2)を以下のような漸化式に変形し、離散時刻 $t^{(m)}$ での購入数 $I_i(t) \equiv I_i(t^{(m)})$ を求めるものとする。

$$I_i(t) \equiv I_i(t^{(m)}) = S_i(t^{(m)}) - \sum_{j=0}^{m-1} I_i(t^{(j)}) \Phi_i(t; t^{(j)}) \quad (6)$$

ただし $I_i(t^{(0)})$ を初期時刻での購入数として与える。こうして導出した $I_i(t)$ を用いれば、量 $N_i(t; t')$ の算出が可能となる。

一方、時刻 t における機器 i のストック分が単位パフォーマンスを実施するために消費する電気量 $W_i(t)$ は、以下の式で算出できる。

$$W_i(t) \equiv W_i(t^{(m)}) = \sum_{j=0}^m w_i(t^{(j)}) I_i(t^{(j)}) \Phi_i(t; t^{(j)}) \quad (7)$$

$W_i(t)$ が既知⁶⁾の場合、式(6)と類似の漸化式に変形して上式中の $w_i(t^{(j)})$ 、すなわち、式(1)中の数量 $w_i(t')$ を算出することができる。

数量 $w_i(t)$ の逆数は機器 i のエネルギー効率 $\varepsilon_i(t)$ に比例するが、簡単のため以下では効率が公表されていないものについては、当該効率が一種の学習曲線に従って経年変化するものと仮定しよう。すなわち、

$$\varepsilon_i(t) = a \zeta(t; t_0, b) + c \quad (8)$$

ここで $\zeta(t; t_0, b)$ は以下のジグモイド (Sigmoid) 関数とする。

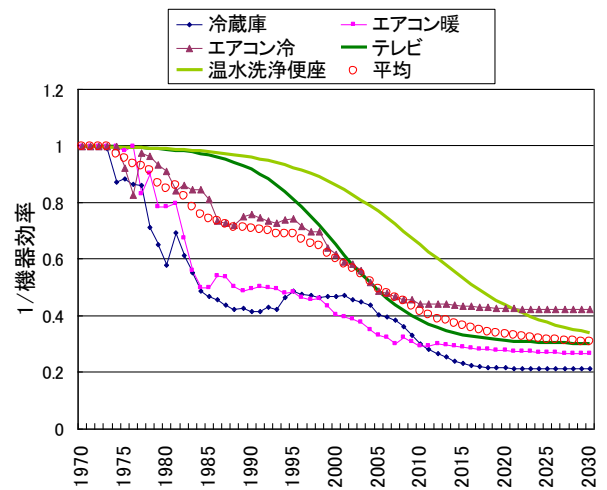


Fig.3 代表的家電機器のエネルギー効率（機器効率）の経年変化

$$\zeta(t; t_0, b) \equiv [1 + \tanh \{b(t - t_0)\}] / 2 \quad (9)$$

ただし、 a, b, c は定数であり、それらの値は文献^{7,9)}に基づいて推算する。また、浦安市民一人あたりの機器 i の保有数 S_i についても、それがデータとして公表されていない（将来も含む）時間範囲では、同様に以下のジグモイド関数によって内外挿するものとしよう。

$$S_i(t) = C_i \zeta(t; T_i, B_i) \quad (10)$$

ただし C_i, T_i, B_i は定数である。

以下では機器 i を次のように設定するが、これらのうち $i=1 \sim 10$ にはエネルギー効率や世帯あたりの機器保有数に関する我が国全体の平均データが公表されている。^{5,6)} $i=1$: 暖房モードで利用するルームエアコン、 $i=2$: 冷房モードで利用するルームエアコン、 $i=3$: 温風ヒーター、 $i=4$: 電気カーペット、 $i=5$: 電気洗浄便座、 $i=6$: 電気冷蔵庫、 $i=7$: 電気掃除機、 $i=8$: 電気洗濯機、 $i=9$: 電子レンジ、 $i=10$: カラーテレビ、 $i=11$: 照明機器、および $i=12$: コンセントを利用するその他の電気機器（以後、これを「その他の機器」と記述する）。既述のとおり、これらの電気利用量を各年ごとに集計することで、Fig. 1から示唆される電気使用量の経年変化曲線となることに注意しよう。

Fig.2に上記のアイテム1から10までの家電機器の、浦安市民一人あたり保有数 $S_i(t)$ の実測値、およびジグモイド関数による内外挿曲線を示す。ジグモイド関数の定数は修正カイ二乗値、 χ^{*2} を最小

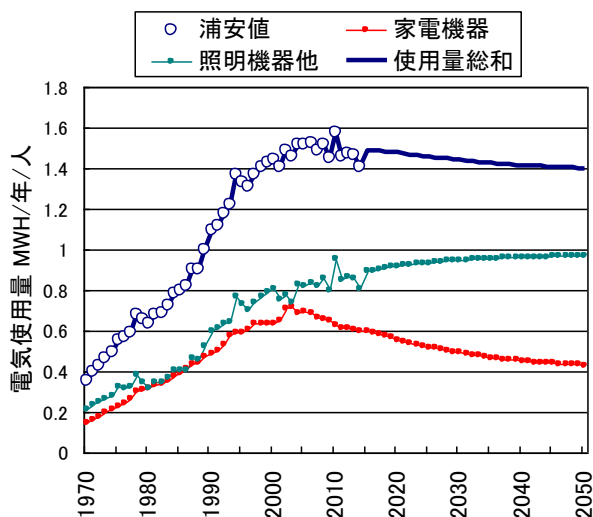


Fig.4 家電機器および照明機器とその他の機器による電気使用量の経年変化、およびこれらの総和の経年変化。「照明機器他」は「照明機器」と「その他の機器」の和を表す

にする条件により決定したものである。この場合、(詳細を図示しないが) 実測値はこのような成長曲線によくフィットするものであることがわかり、家電機器の購入はある種の学習過程に基づくことが示唆される。

Fig.3 に代表的な家電機器 i についての購入年における平均的なエネルギー効率 $\varepsilon_i(t)$ の経年変化を示す。エアコンの暖房モード ($i=1$)、冷房モード ($i=2$)、冷蔵庫 ($i=6$) の値については文献⁹⁾ によって与えられたストック効率から算出したものである。テレビおよび温水洗浄便座については既述のとおり、文献^{7,9)} によるエネルギー効率の時間的な改善程度をジグモイド曲線にフィッティングさせたものである。また、平均値はこれらの効率の単純な平均であり、効率 $\varepsilon_i(t)$ が不明な機器については、この平均的なエネルギー効率を適用するものとする。

こうした $S_i(t)$, $\varepsilon_i(t)$, $w_i(t)$ および $T_i(t) \equiv T_i$ の標準的な値^{7,8)} を用いる場合、 $i=11$ (照明機器) および $i=12$ (その他の機器) を除く家電機器の利用による電気使用量の経年変化を Fig.4 に示す。これらの家電機器からの寄与は $t \sim 2000$ 年を中心にブロードな極大値を持ち、 $t > 2010$ 年では t の増加とともにしだいに減少して一定値に漸近する傾向を持つ。すなわち、こうした機器類についてはパラダイムの転換を伴う、革新的技術による新機種が登場や顕著なエネルギー効率の上昇がない限り、将来の電気使用量は $t \sim 2000$ 年のほぼ 60% 程度の値に漸近することになる。

Fig.3 において、 $t \sim 2015$ 年での ε_i の広がりから、こうした予測値の不確定幅は仮に $\pm 10\%$ 程度であるとして議論をすすめよう。

3. 照明およびその他の機器による電気使用量

浦安市民 1 人当たりの年間電気使用量 $U(t)$ と Fig.4 に与えた「家電機器」対応の曲線との差が $i=11$ (「照明機器」)、および $i=12$ (「その他の機器」) からの寄与となる。Fig.4 にはこれらの和を「照明機器他」と記し、これによる電気使用量の経年変化も示している。この曲線を以後、 $Y(t)$ と記す。当曲線 $Y(t)$ の $t > 2015$ 年の値はジグモイド曲線による外挿値である。同図には家電機器による使用量との和も使用量総和として示している。全電気使用量に対する機器 $i=11$ および 12 の電気使用量の和の全国平均割合は、2009 年度では 50% をやや上回る程度であるとされている。¹¹⁾ Fig.4 はこの傾向に矛盾しない。

日本国内での照明機器 (白熱灯、蛍光灯、LED ランプ) の年間生産量と輸出入量^{12,13)} をもとに、仮に $w_{i=11}=1$, $T_{i=11}=1$, $w_{i=12}=0$, $T_{i=12}=0$ において、定数を省略して算出した照明機器の電気使用量経年変化曲線は (ここでは図示しないが)、Fig.4 に示した曲線 $Y(t)$ 、すなわち「照明機器他」のそれと極めてよく類似した経年挙動を示す。従って、Fig.4 に示した電気使用量曲線 $Y(t)$ は、その大きな部分が照明機器、および電力消費特性がそれに類似した機器の使用に因っていることを示唆している。しかし、こうした過去の傾向が将来に亘っても現出するとは限らない。以下ではエネルギー効率の改善を考慮しない場合、 $Y(t)$ のうちの割合 η だけが「照明機器」に因ったものであるとしよう。

Fig.4 によれば、 $t \sim 2010$ 年での「照明機器他」による電気使用量は全体の半分以上を超える (すなわち $Y(t)/(\text{全使用量}) \approx 0.8/1.5 \approx 0.53$)。わが国全体では、照明機器のみによる 2009 年度の電気使用量割合は全体の 13.4% であるとされている。¹¹⁾ 南関東地方における家庭の電灯による電気使用量は 2011 年度で平均 0.2 MWh/年/人 の程度とするデータ¹⁸⁾ はあるが、これを凌駕する他地域⁹⁾ も多い。しかし、浦安市における使用量については不明である。いま浦安市におけるパラメータ η は、 $1 > \eta \cdot Y(t)/(\text{全使用量}) > 0.134$ 、すなわち $1 > \eta > 0.25$ の範囲にあるとする。

はじめに、照明機器 ($i=11$) に関する諸量の経年変化状況を検討しよう。このために以下の事柄を仮定する。

(1) 1980 年以降、我国での白熱灯生産数は蛍光灯

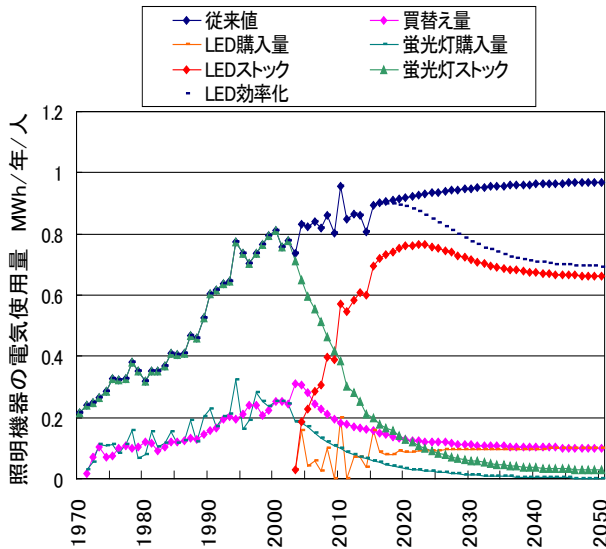


Fig.5 照明機器に関する数量の経年変化。“従来値”は LED 効率が従来と同一の場合の値。LED に関する値は LED が“効率化”される場合の値を表示

のそれを大幅に下回り、¹⁴⁾ 現在ではその製造、輸入ともに禁止の方向にある。¹⁵⁾ 白熱灯の平均寿命は 2000 時間、蛍光灯のそれは 12000 時間であること⁸⁾ からも、浦安市の家庭では全照明機器による電気使用中で白熱灯の占める割合は充分小さいものとする。

(2) $t < 2003$ 年での家庭内での照明手段は主として蛍光灯によるものとし、室内の明るさはランプ数を増やす事によって達成されたとする。 $t \geq 2003$ 年では照明機器の買替え時に蛍光灯は LED ランプ (や有機 EL 照明) にしだいに置き換えられるものとする。2003 年は LED ランプ販売開始年である。買替え時の置き換え率を δ とする。

(3) $t \geq 2003$ 年では新規に購入する照明機器は全て LED ランプであるとする。蛍光灯の購入者は、従来の蛍光灯の買替え者のみであるとする。以下では 2003 年以降での買替え回数を一度だけとするが、こうした場合には、LED ランプ保有数をやや大きめに見積もることになる。

この場合、時刻 t で浦安市民一人あたりが保有する蛍光灯の保有数 $S_f(t)$ 、および LED ランプの保有数 $S_L(t)$ は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$S_f(t) = \sum_{t' < 2003} I_f(t') \Phi_f(t, t') + \sum_{t' \geq 2003} (1 - \delta) R_f(t') \Phi_f(t, t') \quad (11)$$

$$S_L(t) = \sum_{t' \geq 2003} \left\{ \delta \cdot R_f(t') + \frac{dS_{i=11}(t')}{dt'} \Phi_L(t, t') \right\} + R_L(t) \quad (12)$$

添字 f, L は蛍光灯、および LED ランプを表し、 R は買替え数とする。また $S_{i=11}(t) = S_f(t) + S_L(t)$ である。また、時刻 t での買替え数 $R_f(t)$ 、 $R_L(t)$ はそれぞれ以下のように与えられる。

$$R_f(t) = \sum_{t'=0}^{t' < 2003} \frac{\partial \Phi_f(t; t')}{\partial t'} I_f(t') = \alpha_f \beta \sum_{t'=0}^{t' < 2003} (t - t')^{\beta-1} \Phi_f(t; t') I_f(t') \quad (13)$$

$$R_L(t) = \sum_{t' \geq 2003} \frac{dS_{i=11}(t')}{dt'} \frac{\partial \Phi_L(t; t')}{\partial t'} \quad (14)$$

これらの数量に対応する電気使用量は前章の式 (1)、(2) と類似の式によって算出できる。例示のため、 $\eta = 1$ とした場合の照明機器に関する電気使用量の経年変化を Fig.5 に示す。実際の数量は当 Fig.5 の η 倍の値である。当図では必要な定数値を文献^{7,8,10,16,17)} による値、またはそれらから示唆される値 ($\delta = \text{一定} = 0.25$) を用いている。また、「買替え量」は $R_f(t) + R_L(t)$ に対する、「購入量」は新規購入と買替え購入の両者を含むものに対する電気使用量である。

さらに、LED ランプは蛍光灯とは発光機構を異にするので、技術的改良によって発光効率の経年的改善(効率化)が将来にわたっても実現されるものとしよう。LED ランプによって一定の光量を与えるために要する電気量 w_L は、次式で与えられるとする。

$$w_L(t) = w_f \left\{ 1.0 - \alpha_L \zeta(t; \tau_L^0, \beta_L) \right\} \quad (15)$$

ただし α_L 、 β_L 、 τ_L^0 は定数、 w_f は蛍光灯が一定の光量を与えるために必要な電気量^{7,8)} である。ここでは $\alpha_L = 0.7$ 、 $\beta_L = 0.07$ 、 $\tau_L^0 = 2030.2$ とする。これらの値は、Fig.3 のエネルギー効率曲線の平均値の時間変化傾向が LED ランプ発光効率の経年変化傾向にも適用できるとして算出したものである。

LED ランプによる電気使用量は、Fig.5 に「LED ストック」として示したとおりの変化で今後、ある極大値に向かって増加することになる。しかし、 $t \sim 2020$ 年でその増加傾向は終息し、その後は一定の漸近値に向けて減少する傾向を持つものとなる。すなわち今後、屋内の明るさは従来どおりに保たれるかまたは増す傾向を有すると予想されるが、それにもかかわらず、「LED ストック」値は時間的に減少す

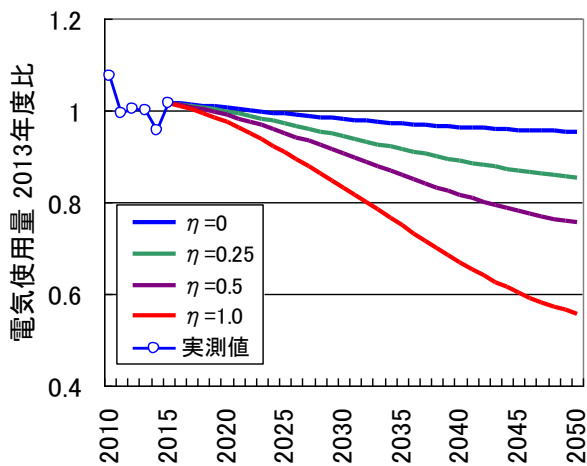


Fig.6 浦安市民の将来の電気使用量の 2013 年度比

ることになる。これは、蛍光灯時代にはその個数の増加で明るさを増したことは異なる、別種のパラダイムの時代となることを意味していよう。なお同図中の「LED 効率化」曲線は「LED ストック」と「蛍光灯ストック」との寄与の和、「従来値」は LED ランプでエネルギー効率化がなされない場合の値である。

$t > 2015$ では照明機器に関して上記のエネルギー効率化(15)を用いる場合、その電気使用量 $U_{i=11}(t)$ および「その他の機器」($i=12$) による使用量 $U_{i=12}(t)$ は各々、簡単に以下の式によって算出できる。

$$U_{i=11}(t) = \eta (w_L(t) / w_f) Y(t) \quad (16)$$

$$U_{i=12}(t) = (1 - \eta) Y(t) \quad (17)$$

ただし $Y(t)$ は既述のとおり、Fig.4 に示した「照明機器他」の曲線値である。蛍光灯が残存する時期には式(16)はやや低い値を、式(17)はやや高い値をそれぞれ与えることになる。また「その他の機器」の一部がエネルギー効率に関して「照明機器」と類似の時間推移をする場合には、これらが $i=11$ への寄与となるように η 値を設定するものとする。これらを用いれば、家電機器分を含めた一人あたりの年間電気使用量 $U(t) (=U_{i<11}(t) + U_{i=11}(t) + U_{i=12}(t))$ が算出でき、こうした値の 2013 年値との比をとれば、これを 2013 年度比とすることができる。この経年挙動を Fig.6 に示す。これを次章では「予測値」として援用する。家電機器、照明機器ともにそれらの予測値の不確定幅を $\pm 10\%$ 程度であるとすれば、特定の η の値での予測値の不確定幅は $\pm 20\%$ 程度となる。Fig.6 によれば、2030 年度における 2013 年度比の電気使用量は $\eta = (0.0, 0.25, 0.5, 1.0)$ の場合、それ

ぞれ (0.98, 0.95, 0.91, 0.83) である。予測値の不確定幅を考慮しても、2030 年度での電気使用量は 2013 年度比で 70%を大幅に下回ることはない。

4. 家庭での電気使用量を左右する要因

民生部門での将来の電気使用量に影響を与え、省エネ (の正負の方向) に寄与する市民レベルの要因として、以下の 5 項目を考慮しよう。これらは浦安市固有のものではなく、いずれの都市においても共通した要因である。

(1) 家庭における太陽光発電パネルや家庭用燃料電池などのエネルギー源の導入：浦安市では 2003 年度から家庭での太陽光パネル設置費の助成制度を確立し、2013 年度からは家庭用燃料電池システム設置のための助成制度も創設した。¹⁹⁾ 市民 1 人当たりの太陽光発電出力数 $Z_s(t)$ [MWh/年/人] の増加傾向は、2013 年度までのデータ¹⁶⁾ を用いれば以下のジグモイド関数でよく近似できる。

$$Z_s(t) = 4.6 H \zeta(t; 2013.0, 0.274) / P(t) \approx 0.03 \zeta(t; 2013.0, 0.274) \quad (18)$$

ただし $P(t)$ は浦安市の人口、 H は年間の発電時間 (千葉県ではほぼ 1000 時間)²⁰⁾ である。上式によれば、発電量には上限値が存在する。 $Z_s(t)$ が大きく増えない理由は浦安市では集合住宅の占める割合が高く、こうした住宅での太陽電池パネルの設置が困難であることによる。家庭用燃料電池も太陽光発電と類似の時間挙動傾向で同程度の導入量が達成されるとする場合、これらからの寄与による省エネ電力分 $\Psi_1(t)$ の程度は、 $t \gg 2015$ 年において $O(\Psi_1(t)) = 0.04 U(t)$ の程度となる。ただし $O(x)$ は量 x のオーダーを表わし、 $U(t)$ は既述の予測値である。

(2) 家屋の断熱構造化への改造：一般に、この種の改造は家屋の改築やリフォームに際してなされる。改築に際して被層ガラスや断熱材などを用いる改造希望者²¹⁾ は約 20%、家屋の改築寿命を 30 年、改築は一戸建て住宅 (浦安市の全世帯数に対するその世帯数の比は既述のとおり、約 0.2) のみとすれば、今後の家屋の断熱構造化による 1 人当たりの省エネ電力分 $\Psi_2(t)$ は、以下の程度となる。

$$O(\Psi_2(t)) = \frac{0.2 \times 0.2 (t - 2015)}{30} \Omega_2(t) U(t) \quad (19)$$

ただし、断熱構造化した住宅数の増加とともに、そ

れに起因する節電分も時間とともに増加するとしている。また、 $\Omega_2(t)$ は以下で定義される因子である。

$$\Omega_2(t) \equiv \frac{\sum_{i=1}^{1\sim 4,12} w_i(t) S_i(t) T_i(t)}{\sum_{i=1}^{12} w_i(t) S_i(t) T_i(t)} \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{1\sim 4,12} w_i^S(t) S_i^S(t) T_i^S(t)}{\sum_{i=1}^{1\sim 4,12} w_i(t) S_i(t) T_i(t)} \right) \quad (20)$$

ここで w 、 S 、 T は前章までに定義された変数、上付き添字 S は家屋改造後の冷暖房関連機器に対応する値を示す。いま、上式右辺の第一因子の値を ~ 0.4 、第二因子を ~ 0.5 とする場合、 $\Psi_2(t)$ は $O(\Psi_2(t)) = 3 \times 10^{-4} (t-2015) U(t)$ となる。

(3) スマートメータや **HEMS** などの設置に基づく省エネ：これらの消費電力管理・制御システムはエネルギー消費を自動的に制御するとともに、居住者による過剰消費に対して注意を喚起し、それらをフィードバックして省エネおよび省エネ行動につながる意図を有している。^{22,23,24} 現在、浦安市では市内の住宅を対象とした電力や都市ガス消費の制御・情報提供システムの設置計画が進みつつある。和泉市や京阪奈地区での数十世帯を対象としたこの種の情報提供システム設置試験²⁵ では、テレビ、高機能便座、厨房機器などの電気使用量の日負荷曲線や平均値などを各家庭に発信している。家族はこうした情報をフィードバックすることで電気の過剰使用を抑制した結果、テレビでは平均 3.4%、高機能便座では 23%、電気ポットでは 33% などの省エネ行動につながったとしている。また同様なシステムで、平均 9% の省エネが達成されたとする報告²⁵ もある。スマートメータや **HEMS** の設置によって電気の有効利用や電気使用量の「見える化」が促進され、それによって市民が常に省エネ行動を積極的に取る場合、この機構による省エネ電力分 Ψ_3 のオーダは、以下の程度となる。

$$O(\Psi_3(t)) = \Omega_3(t) f U(t) \quad (21)$$

ただし f はこの種のシステムを設置する家庭の割合であり、 $\Omega_3(t)$ は以下に与える因子である。

$$\Omega_3(t) \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} w_i^S(t) S_i^S(t) T_i^S(t)}{\sum_{i=1}^{12} w_i(t) S_i(t) T_i(t)} \quad (22)$$

ここで上付き添字 S はスマートメータや **HEMS** 設置後の各機器の値である。近い将来、浦安市では $O(f) = 1.0$ になるとし、 $\Omega_3(t) = 0.1$ とする場合、 $\Psi_3(t)$ は $O(\Psi_3(t)) = 0.1 U(t)$ の程度となる。

(4) メディアを利用した省エネ広報の拡大と省エネ行動への誘起：上記(1)~(3) はハードシステムの設置によるものであるが、近隣の家庭やコミュニティでの状況と消費者自身の状況との比較情報を与えることによって、省エネ行動の促進につながる事が指摘されている。^{26,27,28} すなわち、周囲の社会の平均的傾向とコミュニティ内での自身の相対的位置情報とが、当人にとっての重要な行動規範となるのである。こうした人々の傾向を利用した省エネ戦略の一例は **Opower** によるものであろう。^{27,29} **Opower** は定期的に当人や当人の属するコミュニティの平均的な省エネの程度を知らせる冊子を配布したが、人々はこれによって競合して省エネ行動にフィードバックしたため、有効な効果があったとしている。試みた米国の 60 万世帯での効果は家庭ごとに異なり均質ではなかったが、平均 0.3~6.3% の節電効果があり、投入費用当たり $\sim 2\%$ 節電/(10.2\$/年/戸)であった。こうした効果は情報提供後、約 1 ヶ月から顕著となるが、情報提供を停止すれば家庭での省エネ努力も消失することが予想される。情報提供とともに何らかのインセンティブを提供する方法によっても省エネ効果は現れるとする報告²⁸ はあるが、この種の方法では常に人々に刺激を与え続けておく必要がある。

2011 年の夏季、我が国では全国的な電力危機に遭遇したため、行政や電気事業者は大規模な節電キャンペーンを実施した。そうしたキャンペーンはその後も継続されたため、東京での 2011~2013 年夏季の電力使用量は、2010 年のそれに比していずれの年も約 10% 程度低下したとされている。³¹ 人々のこうした自主的な省エネ行動は異常とも言える社会環境の下で行われたものであったとはいえ、節電キャンペーンにตอบสนองして行われたものであれば、これはメディアを利用した人々への訴求が有効であることを物語るものであるといえよう。しかし、平常な社会環境での応答については定量的観測はない。また、人々の省エネやエコロジカルな態度を説得によって変容させようとする試みの困難さについては、広く

指摘されているところでもある。²⁷⁾

メディアやオピニオンリーダーによるキャンペーンは個人々の態度を変容させ、社会の平均値を動かす直接的な効果を持ち得るが、それに加え、その事項に関して人々相互のコミュニケーションを誘起する効果も無視できない。これはコミュニティの人々にある特定方向への行動を喚起し、それが社会的圧力として周囲の人々に波及し、社会的に大きな影響を及ぼすことになるためである。HIV キャンペーンはこうしたものの一例であるが、ここではキャンペーンの規模に依存して人々の態度変容量が現出したと報告されている。^{32, 33)} 一方、1990年代～2000年代、米国で行われた禁煙キャンペーンの分析³⁴⁾によれば、1985年から2003年でのキャンペーンでは年間2億ドルから9億ドルが投入され、この間に成人の喫煙者は29.5%から18.6%に減少したとされている。資源投入の補正なども行えば、喫煙者の態度変容は10年間で10%、その効果のコストは22.18\$/年/人程度であるとしている。

こうした情報をもとに、将来、浦安市で十分な省エネキャンペーンが継続して実施される場合には、その効果 Ψ_4 は $O(\Psi_4(t)) = 0.1 U(t)$ の程度となる。

(5) グローバルな温暖化や都市化による夏季および冬季の気温の変化：浦安市が将来、いかに温暖化するかについては明確ではない。浦安市の温暖化要因は、(i) 温室効果ガスの大気中蓄積に起源するもの、および(ii) 都市化によるヒートアイランド効果に起源するものである。

(i) に関する西暦2006年以降の気温変動の傾向は、GCMによって外挿したIPCCシナリオ³⁵⁾によれば、低い温室効果ガス放出シナリオ(RCP2.6)では今世紀末に信頼度90%の範囲で全世界平均 $1.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$ 、高い放出シナリオ(RCP8.6)では $3.7 \pm 0.7^\circ\text{C}$ だけの気温上昇となる。しかし、実際には地域ごとの変動幅や各年ごとの気温の揺らぎは大きい。さらに、季節的にも均質な変動ではなく、北日本では冬季には温暖化が進むが、夏季には従来の気温と大幅に変わることはないとする予想³⁶⁾もある。

一方、都市化による浦安市の温暖化を示唆する結果³⁷⁾はあるが、定量化は困難である。我が国の都市一般についてみれば、都市化による気温の上昇程度は地球温暖化の程度と同程度であるとする分析³⁸⁾もある。ここではそれを採用しよう。

東京における住宅系街区の電力需要と気温との関係に関する調査結果³⁹⁾によれば、温暖化による冷房需要増加による使用電力増加率 ξ_s は $\sim 17.0\%/^\circ\text{C}$ 、

冬季の寒冷化による暖房需要増加率 ξ_w については $\sim 10.6\%/^\circ\text{C}$ 程度である。従って

$$\Psi_6(t) \approx 2 \{ \xi_s \phi_s(t) - \xi_w \phi_w(t) \} \Delta T(t) U(t) \quad (21)$$

ただし ϕ_s 、 ϕ_w は年間に占める夏季、冬季の日数割合、 ΔT は上記機構(i)による浦安市内での平均気温上昇度であり、右辺の因子2は機構(i)と(ii)の両者を考慮したことによる。従って、 Ψ_6 のオーダーは

$$O(\Psi_6(t)) = (t - 2015) \Delta T(2100) U(t) / 3300 \\ \approx 0.001 \times (t - 2015) U(t) \quad (22)$$

の程度となる。ただし $\Delta T(2100)$ は機構(i)による2100年での気温上昇度である。

以上の因子(1)～(5)を考慮し、省エネ効果は重なりあいや相乗効果の現出もなく、単純に足し合わせることができるでしょう。浦安市民のこうした節電努力も含めた場合、時刻 t での浦安市民1人当たりの年間電気使用量 $E_U(t)$ は以下に与えられるものとなる。

$$E_U(t) = U(t) - \sum_{k=1}^4 \Psi_k(t) + \Psi_5(t) \\ = \{ 0.76 + 7 \times 10^{-4} (t - 2015) \} U(t) \\ \approx 0.77 U(t) \quad (23)$$

ただし、係数の算出には $t=2030$ を用いている。すなわちこの場合、市民レベルでの省エネ行動によって、予測値の23%程度の節電が期待できることになる。

上記の因子(4)はいわゆるパブリックリレーションズに分類されるものであり、そうした「説得」に応じて、浦安市民は具体的な節電につながる(1)～(3)の行動をとることになるとも考えられる。因子(4)は動機付けの因子であり、直接的な節電行動ではないとすれば、浦安市民1人当たりの年間電気使用量は以下で与えられるものとなる。

$$E_U(t) = U(t) - \Psi_1(t) - \Psi_2(t) - \Psi_3(t) + \Psi_5(t) \\ = \{ 0.86 + 7 \times 10^{-4} (t - 2015) \} U(t) \\ \approx 0.87 U(t) \quad (24)$$

従ってこの場合、約13%の節電が可能となる。

以上のことから、各家庭ごとの節電努力によって13～23%の省エネが可能となると予想される。この削減量は2030年での年間電気使用量に対するパーセント値であるが、それはオーダーの推定にすぎないことに注意すれば、2013年度との比で表した削減量もまた、推定誤差の範囲内でほぼ、この値になると

みなすことができよう。

5. おわりに

当報文では 2015 年以降、浦安市民が家庭で消費する電気量をボトムアップ方式で予測した。この場合、大型電気機器類の保有数やエネルギー効率の経年変化はジグモイド関数で表現できるものとした。また、実際の電気使用量とこれら大型機器類による電気使用量との差は、「照明機器」および「コンセントを利用するその他の電気機器（その他の機器）」による消費によるものであるとして、「照明機器」や「その他の機器」の保有数変動を予測した。2003 年以降の照明機器はしだいに LED ランプに置換されるとし、また個々の家庭での使用量削減要因なども考慮して、 $t > 2015$ 年での浦安市民の電気使用量を算出した。この結果、以下のことがわかった。

(1) 省エネの観点からは、LED ランプやコンセント利用の家電機器のエネルギー効率が良好に改善され続けることが重要となる。例えば従来の大型家電機器と同様に、30 年間で約 3 倍の効率改善が続く場合には、2030 年度では 2013 年度比で最大 17% の電気使用量の削減が可能となる。ただしこれは $\eta = 1$ の場合であり、 η は大型家電機器を除いた機器による電気使用量に対する照明機器（および、これに類似する電力消費特性を有する機器）のみによる使用量の比である。

資源エネルギー庁の見通しによれば、家庭部門での省エネルギーは 2030 年度で 2013 年度の 19% 減になるとされている。⁴⁰⁾ この値は上記の $\eta = 1$ の場合に近いが、一般には $\eta < 1$ であり、見通しの実現のためには、次項(2)の個々の家庭での節電努力が期待されることになる。

(2) 個々の家庭での省エネ諸要因を考慮すれば、年間の電気使用量をさらに 13~23% 程度、引き下げることができる。前項の値とあわせ、 $\eta = 1$ の場合、2030 年度には 2013 年度比で最大 30~40% 程度の使用量削減が可能となることになる。予測の不確定性を考慮すれば浦安市の場合、地球温暖化防止のため 2030 年度で家庭部門での電気使用量を現在より 40% 程度、削減する²⁾ ことは可能なようにもみえる。しかし、こうした数値 30~40% はいわば「理想的な仮定のもとでの最大値」であり、容易な達成は困難であろう。

(3) 前項(1)は LED 化の推進などによる電気使用量の削減、(2)は各家庭での努力による使用量削減であ

る。上記の 40% の削減達成のためには、後者(2)による削減行動を強く動機付け、サポートする官民の体制やシステムの存在が欠かせない。各種の補助金制度の新設や家庭レベルの経済的なインセンティブ導入などがこれに当たる。

家庭レベルでの省エネ行動は市民各人の個人的努力に負うか、またはライフスタイルの変容を要するものも少なくない。こうした性向を定着させるには常に外部からの働きかけが必要で、かつ重要なものとなる。そうした観点からは、行政や企業などが種々の省エネキャンペーンを継続し続けることは、たとえそれらが直ちに効果を表さない場合であっても意味のあることとなる。一方、市民の中にあつては、コミュニティ内で人々に省エネ行動を勧める草の根運動も、今後は重要視されるものとなろう。

参考文献

- 1) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (編)(2015)「エネルギー経済統計要覧 2015」一般財団法人省エネルギーセンター
- 2) 地球温暖化対策推進本部 (2015 年 7 月 17 日)「日本の約束草案 (案)」<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai30/siryoku2.pdf>
- 3) 浦安市「浦安市統計」各年度版
- 4) 浦安市 (2010)「浦安市分譲集合住宅実態調査報告書」
- 5) (株)住環境計画研究所 (編) (2013)「2014 家庭用エネルギーハンドブック」省エネルギーセンター
- 6) 内閣府経済社会総合研究所景気統計部「消費動向調査」(2014 年 3 月実施調査結果)
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁 (2000)「省エネ性能カタログ 2000 年冬版」
- 8) 経済産業省資源エネルギー庁 (2014)「省エネ性能カタログ 2014 年冬版」
- 9) 社団法人日本建築学会 (2002)「『住宅内のエネルギー消費に関する全国的調査研究』報告書」
- 10) 家電ハンドブック編集専門委員会 (編) (2014)「家電産業ハンドブック 2014」家電製品協会
- 11) 資源エネルギー庁 (2016 年 3 月アクセス)「家庭エネルギー消費の実態」http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/actual/、中国電力 Energia (2016 年 3 月アクセス)「主要家電製品の消費電力量」<http://www.energia-support.com/setsuden/point.html>
- 12) 経済産業省経済産業政策局調査統計部 (編)「経済産業省生産動態統計年報機会統計編」各年度版

- 13) 通商産業大臣官房調査統計部 (編) 「機械統計年報」各年度版
- 14) 財団法人機械振興協会経済研究所 (1992) 「生産動態統計長期動向分析 品目別年次時系列 生産編」
- 15) 朝日新聞 (2015 年 11 月 26 日) 「蛍光灯実質製造禁止へ 白熱灯も 20 年度めど LED に」
- 16) 清水恵一 (2011) 「LED 照明の現状と将来予測」『電気学会誌』131(3), 147-150
- 17) 首相官邸 (2010 年 6 月 18 日) 「新成長戦略～『元気な日本』復活のシナリオ」<http://www.kantei.go.jp/jp/kagugikettei/2010/sinseichou01.pdf>
- 18) 株式会社三菱総合研究所環境エネルギー研究本部 (2012) 「平成 23 年度エネルギー消費状況調査報告書」
- 19) 浦安市都市環境部環境保全課 (2015) 「浦安市環境基本計画年次報告書平成 26 年度版」
- 20) 新エネルギー産業技術総合開発機構(2013) 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書」
- 21) 内閣府大臣官房政府広報室「地球温暖化対策に関する世論調査」(平成 17 年 7 月調査)
- 22) 石田健一、佐藤誠 (2005) 「HEMS による家庭用冷暖房照明エネルギーの削減効果の検証」日本建築学会環境系論文集、No.595, 57-64
- 23) 井垣宏、瀬戸口英晴、福田将之、松本真佑、中村匡秀 (2012) 「家庭における省エネ促進のための電力消費振り返りサービスの事業と評価」『電子情報通信学会論文誌』J95-D (No.4), 778-789
- 24) 本藤祐樹 (2012) 「見える化がもたらす家庭における省エネの可能性－三つの見える化－」 J. Japan Inst. Energy 91, 563-569
- 25) 二階堂智、稲田亮、佐伯修、辻毅一郎、松岡武彦 (2005) 「住宅における消費情報提供システムによる省エネルギー効果の統計的研究」『第 24 回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集』203-206
- 26) Fray, B.S. and Meier, S. (2004) Social Comparison and Pro-social Behavior: Testing “Conditional Cooperation” in a Field Experiment, *Am.Economic Rev.* 94, 1717-1722.
- 27) Allcott, H. (2011) Social Norms and Energy Conservation, *J.Pub.Economics* 95, 1082-1095
- 28) Frederiks, E.R., Stenner, K., and Hobman, E.V. (2015) Household Energy Use: Applying Behavioral Economics to Understand Consumer Decision-making and Behavior, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 95, 1082-1095.
- 29) 小松秀徳、西尾健一郎 (2013) 「省エネルギー節電促進策のための情報提供における「ナッジ」の活用－米国における家庭向けエネルギーレポートの例－」『電力中央研究所研究報告』Y12035
- 30) Marthinus, J.B., Cumming, T.D., Osborne, K.P., et al. (2010) Encouraging Electricity Savings in a Residential Hall through a Combination of Feedback, Visual Prompts, and Incentives, *J.Appl.Behavior.Anal.* 43, 327-331.
- 31) 西尾健一郎 (2015) 「家庭における 2011-2014 夏の節電の実態」『電力中央研究所研究報告』Y14014
- 32) Slutkin,G., Okware,S., Naanara,W. et al. (2006) How Uganda Reversed Its HIV Epidemic, *AIDS Behavior* 10, 351-361
- 33) Geary,C.W., Burke,H.M., Castelnau,L. et al. (2007) MTV’s “Staying Alive” Global Campaign Promoted Interpersonal Communication about HIV and Positive Beliefs about HIV Protection, *AIDS Educ.Prevention* 19, 51-67
- 34) Farrelly, M.C., Pechacek,T.F., Thomas,K.Y. and Nelson,D. (2008) The Impact of Tobacco Control Program on Adult Smoking, *Am.J.Pub.Health* 98, 304-308
- 35) Collins,M., Knutti,R., Arblaster, J. et al. (2013) “Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility” in “Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Fifth Assessment Report of IPCC”, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK
- 36) 下野裕之 (2008) 「地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響」*Jap.J.Crop Sci.* 77(4), 489-497
- 37) 大西輝明、島野圭司、大村勝行、川島謙治、杉岡洋子 (2014) 「浦安の温暖化評価：過去 65 年間に浦安の気温はどう変化したのか」<http://ohnishi.ecnet.jp/recentworks/UrayasuWarming.pdf>
- 38) 増田啓子 (2000) 「人間活動がつくる大都市の気候」『龍谷紀要』22(1), 115-128
- 39) 玄地裕、大野創介、亀卦川幸浩、山口和貴 (2005) 「東京都における電力需要の分析～事務所系、住宅系街区の電力需要量と気温の関係について～」『第 24 回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集』265-268
- 40) 資源エネルギー庁 (2015 4 月) 「エネルギー需要見通しについて」(総合資源エネルギー調査会長期エネルギー需給見通し小委員会資料)

FUTURE PROSPECT OF ELECTRICITY DEMAND AND LIMITS TO ENERGY SAVING BY THE DOMESTIC HOUSEHOLD SECTOR: THE CASE OF URAYASU CITY

Teruaki OHNISHI¹, Keiji SHIMANO², and Osami OKADA³

¹ Dr.Sci., Institute of Science and technology for Society, Director (E-mail:ohnishiteruaki@yahoo.co.jp)

² M.Eng., Urayasu Climate Change Prevention (E-mail: keijishimano@k4.dion.ne.jp)

³ Dr.Eng., Institute of Science and Technology for Society, Director (E-mail: okadaomk@pb3.so-net.ne.jp)

The estimate of electricity demand in future was made for the household sector of Urayasu city as an example. Assuming the consuming groups of electricity which are large-type electricity appliances and room lights and other appliances, the electricity demand from those groups were estimated by the bottom-up method with the introduction of Sigmoid function. The extent of energy-saving made on a level of citizens as responses of public relations were also estimated. It became clear that the possible reduction of electricity use originating from the domestic electricity appliances and its total reduction including the energy saving effort by citizens in 2030 is maximum ~17% and 30~40% of the use in 2013, respectively.

Key Words: *Domestic household sector, Electricity demand, Future prospect, Energy saving, Urayasu city*