

# 家庭用燃料電池の動作モデルを表現する線形近似式の提案

## Proposal of a linear approximation to represent behavior of home fuel cell

柴野直人<sup>†</sup> 井上玲<sup>†</sup> 豊川元務<sup>‡</sup> 金田重郎<sup>‡</sup>  
Naoto Shibano Rei Inoue Motomu Toyokawa Shigeo Kaneda

<sup>†</sup>同志社大学大学院 理工学研究科

<sup>‡</sup>同志社大学 理工学部

<sup>†</sup> Doshisha University Graduate School of Science and Engineering

<sup>‡</sup> Doshisha University Faculty of Science and Engineering

### 要旨

近年、家庭でのエネルギーマネージメント (HEMS) が注目され、家庭用燃料電池の普及が進んでいる。しかし、家庭用燃料電池は原理が複雑であるため、実際の省エネ効果が分かり難いという問題がある。この問題を回避するため、本稿では、家庭用燃料電池(SOFC)の特性を生かした線形近似式を示す。この線形近似式を用いれば、家庭用燃料電池の総発電量から、必要ガス量や湯沸かし量を簡単な計算で導出でき、家庭用燃料電池の光熱費の削減効果を定量的に把握できる。更に、線形近似式の感度解析により、家庭用燃料電池の動作面での課題を明らかにする。

## 1. はじめに

近年、省エネが重要視され、家庭用燃料電池の普及が期待されている。家庭用燃料電池は、家庭用・固体高分子形燃料電池[1] (PEFC) と家庭用・固体酸化物形燃料電池[2] (SOFC) の2種類に大きく分けられる。燃料電池(PEFC)[1]は、家庭の消費電力パターンを学習して、稼働制御を行っている。家庭の消費電力パターンに応じて発電を行うため、制御が複雑であり、導入効果の評価が難しく、社会実験の結果に依存している。一方、高効率な燃料電池(SOFC) [2] は、電主熱従の制御を行っているため、動作が消費電力で決定可能である。

そこで本稿では、燃料電池(SOFC) [2] の動作を線型近似式で表現することを提案し、近似式によって、燃料電池の導入効果を、容易に推定できることを示す。燃料電池の動作を線形近似式で表せることは、都市ガス利用量や生成されるお湯の熱量が生成された総電力のみに依存し、家庭における消費電力パターンに依存しないことを意味する。尚、以下の本稿の議論では、家庭用・固体酸化物形燃料電池[2](SOFC) を「燃料電池」と表現している。

以下、第2章では、研究背景と研究目的について述べ、第3章では、燃料電池の仕組みと燃料電池の動作をモデル化した線形近似式について述べる。第4章では、線形近似式を用いて燃料電池の導入における光熱費の有効性について述べる。第5章では、線形近似式を用いて燃料電池の課題の読み取りを行い、第6章は、今後の展望とまとめである。

## 2. 研究背景・目的

燃料電池は、高い発電効率を有しており、その実用化・普及への期待が大きく、化石燃料が本来持つエネルギーを無駄なく利用できるため、省エネである。そのため、我が国では世界に先駆けて燃料電池が2009年より市販され、既に多くの家庭に導入されつつある。しかし、ほかの省エネ機器と比べて原理が複雑であるため、実際の導入効果について直感的に分かり難いという問題を持つ。そのため、燃料電池の導入に関して、燃料電池メーカー側による導入効果の公表値しか、導入判断のための材料が無いのが現状である。

本研究では、燃料電池の導入効果を明示するために特性の線形近似式を提案する。燃料電池の発電量を線形近似すれば、家庭の消費電力量パターンを一切考慮せずに、その総消費電力のみから、ただちに

ガスの消費量や、沸いたお湯の熱量を推定できる. 具体的には, 1ヶ月当たりの発電量を  $P_{\text{発電量}}[\text{kWh}/\text{月}]$ , 1ヶ月の消費する都市ガス量を  $S_{\text{都市ガス量}}[\text{kWh}/\text{月}]$ , 1ヶ月間の水の加温熱量を  $S_{\text{加温熱量}}[\text{kWh}/\text{月}]$  とすると,

$$S_{\text{都市ガス量月}} = 1.52 \times P_{\text{発電量月}} + 308 \quad [\text{kWh}/\text{月}] \quad (1)$$

$$S_{\text{加温熱量月}} = 0.68 \times P_{\text{発電量月}} + 116 \quad [\text{kWh}/\text{月}] \quad (2)$$

と表せる (式の導出方法は, 3.1 章で後述). 燃料電池特性の線形近似で, 燃料電池の導入を考量している家庭に対して, 燃料電池の導入効果を評価する簡明な手段となる.

### 3. 燃料電池における特性の線形近似式の導出

燃料電池(SOFC)は, 都市ガスから電力を生成し, 副産物としてお湯の生成も可能である. 同時に電力とお湯を作る「コージェネレーション」の一種である. ただし, 都市ガスやプロパンガスが直接に電力変換されるわけではない. 都市ガスのままでは燃料電池が作動しないため, 燃料電池では, まず都市ガスから水素ガス( $\text{H}_2$ ), あるいは一酸化炭素ガス ( $\text{CO}$ ) を生成する. 燃料電池は非常に高い発電効率を有しており, 実際に本稿で対象とする最新鋭の燃料電池は, 700[W] 出力時で 46.5%の発電効率, 副産物であるお湯の生成を含めると 90%の高い熱効率を誇っている[3].

燃料電池の特徴として, 発電する電力に依存して, 発電と熱生成の効率に大きな変化が生じる. 図1, 図2は, 新エネルギー財団 (NEF) 資料[4]から引用しており, それぞれ H22 年度における燃料電池の発電効率と発電熱効率を示している. 横軸は, 燃料電池の稼働によって発電する電力である. 縦軸は都市ガスのエネルギーから電気を発電する際の発電効率 (図1) と発電熱効率 (図2) である. 図1を見ると, 燃料電池の発電効率は, 発電する電力が大きな領域では高いが, 小さくなるとともに, 急速に低下している. 一方, お湯として取り出されるエネルギー (図2) は, 発電する電力にあまり依存せず, 投入した都市ガス量に応じた発熱を示している.

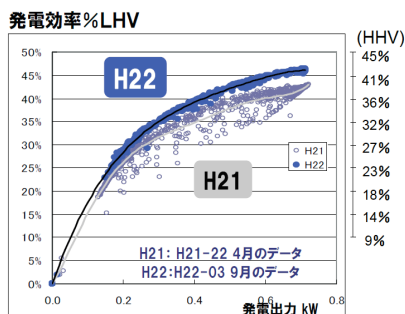


図1 燃料電池の発電効率[3]

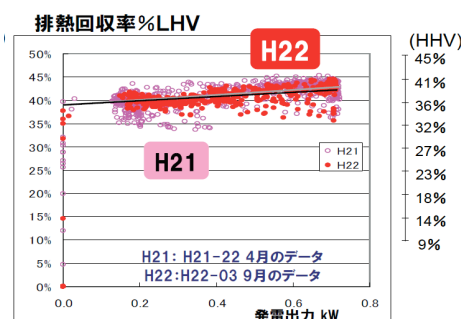


図2 燃料電池の発電熱効率[3]

#### 3.1. 線形近似式の導出方法

図1, 図2を線形近似式に置き換える. 図1における発電効率, 及び図2における発電熱効率をデジタイザによって取得した. 取得したデータを表1に示す. 尚, 以下の本稿の議論では, 燃料電池の発電効率と発電熱効率の合計値を「総合効率」と表現する.

表1に基づいて, 発電量と消費する都市ガス量との線形近似式を導出する. 但し, 発電量を  $P_{\text{発電量}}[\text{kW}]$ , 消費する都市ガス量を  $S_{\text{都市ガス量}}[\text{kWh}]$  とした. 近似式の信頼性を計る (重) 相関係数の累乗は  $R^2 = 0.9968$  である.

$$S_{\text{都市ガス量}} = 1.52 \times P_{\text{発電量}} + 0.428 \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

副産物である熱と発電量の関係は, 水の加温熱量を  $S_{\text{加温熱量}}[\text{kWh}]$  として, 以下のようなになる. 近似式の信頼性を計る (重) 相関係数の累乗は  $R^2 = 0.9954$  である.

$$S_{\text{加温熱量}} = 0.68 \times P_{\text{発電量}} + 0.161 \quad [\text{kWh}] \quad (4)$$

都市ガスも電力も料金は基本的に月単位であり, 上記の2式に 24 [時間] × 30 [日] を乗じ, 1ヶ月あた

りの都市ガス量，及び水の加温熱量を，電力の発電量との関係で，以下のように表現する．

$$S_{\text{都市ガス/月}} = 1.52 \times P_{\text{発電量/月}} + 308 \quad [\text{kWh/月}] \quad (5)$$

$$S_{\text{加温熱量/月}} = 0.68 \times P_{\text{発電量/月}} + 116 \quad [\text{kWh/月}] \quad (6)$$

表1 燃料電池の稼働効率

1時間あたりに発電した電気 [kW]	発電効率	発熱効率	総合効率
0.05	10.10 %	39.39 %	49.49 %
0.3	34.84 %	40.77 %	75.61 %
0.7	46.30 %	42.86 %	89.16 %

### 3.2. 線形近似式の導出における考察

式(3) と 式(4) において近似式の信頼性を計る  $R^2$  が高い水準であるため，上記 2 式は燃料電池の実際の動作と合致している可能性が高い．つまり，式(3) と 式(4) はそれぞれ線形近似式であるため，燃料電池の動作モデルは，比例部と固定部から成っていると考えられる．具体的に燃料電池の固定部とは，稼働を維持するために常時消費している電力やガス等が挙げられる．燃料電池は，都市ガス等から直接電力生成ができないため，改質装置を通じて水素や一酸化炭素に変換して電力を生成する仕組みである．この改質装置は，常に一定の温度を保ち，加えて，燃料電池自身のセルも約 900℃ の温度を保っておく必要がある．言い換えると，一定のロスエネルギーが定数項として存在していると推測できる．電力比例部としては，都市ガスを電力に変えるため電力に比例する比例項が存在している．上記の理由から，燃料電池の線形近似式は，有効であり，燃料電池の動作モデルに適している．

## 4. 燃料電池による光熱費の削減効果

家庭用燃料電池の Web サイトでは，年間 7 万円程度の光熱費削減が可能とされている[5]．一般的に，一戸建ての住宅の場合，月間の消費電力は，400[kWh] とされており，また，一戸建ての住宅の月間の消費都市ガス量も，33[m<sup>3</sup>]とされている[6]．尚，都市ガスは，1m<sup>3</sup>に 12.5kWh のエネルギーを持っているため，33[m<sup>3</sup>]は 412.5 [kWh]と書き表せる．燃料電池について，以上の数値を基に，どの程度のコストメリットが得られるのかを，近似的に確認する．

### 4.1. 燃料電池の導入前における光熱費

燃料電池の導入前を考える．消費電力は，前述の 400[kWh/月] を利用する．電力料金は，関西電力・従量電灯 A[7]を適用し，式 (7) の通りとなる．但し，第 1 項は基本料金，第 2 項は 15[kWh/月] を越えて 120[kWh/月] までの単価 20.27 [円/kWh]分，第 3 項は 120[kWh/月] から 300[kWh/月] の単価 26.51 [円/kWh]，最後の項は 300[kWh/月] 以上の単価 30.23 [円/kWh]に相当する．

$$334.22 + 20.27 \times (120 - 15) + 26.51 \times (300 - 120) + 30.23 \times (400 - 300) = 10,257 \quad [\text{円/月}] \quad (7)$$

一方，消費ガス量においても，前述の 33[m<sup>3</sup>/月] を利用する．都市ガスの料金は，大阪ガス「B 料金」[6]を適用し，式 (8) の通りとなる．

$$1260 + 159.50 \times 33 = 6,524 \quad [\text{円/月}] \quad (8)$$

1ヶ月の光熱費は，10,257 + 6,524 = 16,781 (円/月) である．この値が，家庭用燃料電池を導入する前の光熱費の合計である．

### 4.2. 燃料電池の導入後における光熱費

一般的に，燃料電池は，家庭の消費電力の約 70 % が発電可能とされている[8]．以下の本稿の議論では，家庭の消費電力の 70 % が燃料電池によって発電されるとする．消費電力 400[kWh/月] の

70%が燃料電池によって発電されるため、買電電力は、 $400 \times 0.3 = 120$  [kWh/月] である。発電量  $P_{\text{発電量}}$  の  $400 \times 0.7 = 280$  [kWh/月] を式(5)と式(6)にそれぞれ代入すると、 $S_{\text{都市ガス量/月}} = 733.6$  [kWh/月]、 $S_{\text{加温熱量/月}} = 306.4$  [kWh/月] が得られる。一方、燃料電池の導入後の光熱費の計算を行うにあたり、水の加温熱量がどの程度有効利用されたかが重要である。以下の本稿の議論では、燃料電池の発電の際に生じる水の加温熱量の70%が家庭で有効利用されるとする。得られた数値から、家庭で消費する都市ガス量412.5[kWh]は、 $306.4 \times 0.7 = 214.5$  [kWh/月] 削減され、燃料電池による都市ガス消費量は、733.6 [kWh/月] となる。以上を加味して、消費都市ガス量の合計は、

$$733.6 + 412.5 - 214.5 = 931.6 \text{ [kWh/月]} \quad (9)$$

となる。都市ガスは  $1\text{m}^3$  に 12.5kWh のエネルギーを持っているため、これは  $74.5\text{m}^3$  である。

大阪ガスの「マイホーム発電料金[9]」を適用し、夏期料金で計算した結果を以下に示す。

$$4,384 + 84.24 \times 109.0 = 8,363 \text{ [円/月]} \quad (10)$$

一方、買電電力は、120 [kWh/月] であるため、電力料金は、関西電力・従量電灯 A[6]を適用し、以下の金額となる。

$$334.22 + 20.27 \times (120 - 15) = 2,462 \text{ [円/月]} \quad (11)$$

光熱費は、 $8,363 + 2,462 = 10,825$  [円/月] である。最終的に、光熱費は差引  $16,781 - 10,825 = 5,956$  [円/月] のコストメリットがある。

### 4.3. 燃料電池導入による光熱費削減効果の考察

本節では、燃料電池の導入による光熱費の削減効果が、得られる理由について考察する。燃料電池の導入前と導入後によって、5,956 円の削減効果が得られる。この結果として、ガス会社が述べているように、年間7万円以上の削減効果が得られている。言い換えると、燃料電池の特性の線形近似式が実際の燃料電池の物理モデルに適合しているともいえる。線形近似式によって、家庭の総消費電力量と総消費都市ガス量のみで、容易にシミュレーションできる。

光熱費の削減効果として大きな要因となるのは、ガス会社の価格設定である。図4は、関西電力の一般家庭向きの契約である「従量電灯 A」の1 kWhあたりの単価、図5は、大阪ガスのマイホーム発電料金における都市ガス1 kWhあたりの単価である。図5を見ると、都市ガスのマイホーム発電料金は、単価が安く抑えられており、1 kWhあたり10円程度である。一方、図4から、電力は1 kWhあたり25円程度である。図4と図5において注目すべき点は、電力では「多くの電力を使うほど単価が上がる」に対し、都市ガスでは「多くのガスを使えば単価が下がる」といった違いである。この料金体系の違いが、年間約7万円の光熱費削減効果を生む要因となっている。燃料電池によって、電力会社から購入する電力の一部を都市ガスから生成し、結果として、電力会社からの消費電力量が大幅に減少するため、単価が安い電力の購入が可能となる。一方、電力を生成するために消費される都市ガスの量が大幅に増加するので、単価が安い都市ガスの購入が可能となる。その結果が、年間の約7万円の光熱費削減効果となる。

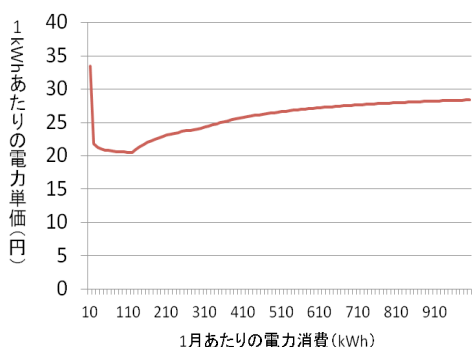


図4 電力単価 (関西電力・従量電灯 A)

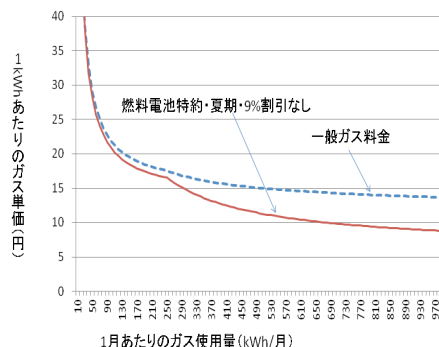


図5 都市ガス単価 (大阪ガス・マイホーム発電料金)

## 5. 燃料電池における課題の発見と分析

特性の線形近似式によって、燃料電池の動作モデルを表現できるため、燃料電池の仕組みを簡明に理解できるだけでなく、燃料電池における課題の発見も容易にする。線形近似式を通じて、燃料電池の課題を分析する。

本研究で得られた式(3)の稼働に必要なガス量を示す線形近似式は、電力に比例する比例項と燃料電池の稼働を維持するために常時消費している定数項に分けられる。結果として、比例項と定数項の二つのパラメータを変更すれば、光熱費の変化を読み取れる。このように、パラメータを変更して変化を読み取ることは、感度解析と呼ばれる。感度解析によって、家庭用燃料電池の光熱費削減効果を増大させるための課題を明らかにする。

### 5.1. 線形近似式の感度解析

本節では、式(3)の稼働に必要なガス量の線形近似式のパラメータを変化させて、光熱費の変化を読み取る。それぞれ比例項は 1.52，定数項は 308 となる。比例項を 5%、10%削減した場合、あるいは、定数項を 5%、10%削減した場合における、光熱費削減効果の推定を行う。なお、家庭の消費電力の 70% が燃料電池によって発電され、燃料電池によって発電される割合を 75%、80%に変化させた場合についても検証を行った。なお、光熱費の計算を行うにあたり、一戸建て家庭の月間の消費電力と消費ガス量等のパラメータや電気会社やガス会社等の料金プランは 4 章の計算方法に基づく。また式(4)の水の加温熱量の線形近似式については、パラメータを変更しない。計算結果を表 2 に示す。燃料電池の稼働に必要なガス量における電力に比例する比例項を 5%、10%と削減した場合、それぞれ月間で約 128 円、約 258 円となり、コンスタントに消費する定数項を 5%、10%と削減した場合には、それぞれ月間で約 93 円、約 186 円となる。また、燃料電池の家庭の消費電力の発電割合を 5%、10%と増加した場合、それぞれ月間で約 279 円、約 557 円という結果となった。

### 5.2. 感度解析による燃料電池の課題の考察

表 2 の結果が示す通り、燃料電池の稼働に必要なガス量における電力に比例する比例項とコンスタントに消費する定数項を削減したとしても、燃料電池の導入効果を大きく上げられない。比例項を 10%削減したとしても月間で約 258 円、定数項を 10%削減したとしても月間で約 186 円の結果となった。比例項と定数項を減少しても、導入効果を向上できない要因として、前述したガスで電気を発電した場合、1kWh 当たり 10 円以下で生成できる点が挙げられる。燃料電池の稼働に必要なガス量を一定分削減したとしても、1kWh 当たりの単価が安い大きい削減効果が期待できない。言い換えると、比例項と定数項がそれぞれ 5%、10%削減した程度では、大きな光熱費の削減効果が得られない。定数項を大きく削減する方法としては、現在市販されているものより大型な燃料電池を複数家庭で共用する手段が考えられる。複数家庭で燃料電池を共用する場合、燃料電池の台数が少なくなるため、固定項も小さくなる。結果として、光熱費の削減効果が向上できる。言い換えると、線形近似式の感度解析によって、燃料電池は、家庭間でのエネルギーの助け合いを行う CEMS が適していることを明らかにした。

一方、家庭の消費電力の約 70%が発電可能とされている燃料電池の発電割合を増加した場合においては、発電割合を 10%増加で約 557 円の光熱費削減効果が可能となる。この数値は、月間での光熱費の削減となるため、年間では約 6,500 円の削減効果が期待できる。年間約 6,500 円の光熱費の削減は、大きいといえる。燃料電池の発電割合を増加した場合の削減効果が大きい要因として、電力会社から電力を購入する場合、1kWh あたり約 25 円程度であるのに対し、ガスで電気を発電するのは、コスト面的に非常に優れている点が挙げられる。燃料電池の発電割合を上げると、単価が高い電気を単価が安いガスに置き換えられる割合が大きくなるため、光熱費削減効果の向上が可能となる。

以上の結果から、燃料電池の導入効果を向上するためには、燃料電池による発電では家庭の発電割合の増加が重要となる。家庭の発電割合を増加するための方法としては、蓄電池による電力消費の平準化



が挙げられる。燃料電池は、上限 700W で最も高い発電効率を有するため、家庭の消費電力 700W 以下の場合には、常時 700W で発電を行い、過剰電力を蓄電池に充電する。逆に、消費電力 700W 以上の場合には蓄電池内の電力を放電して、700W 以上の部分を蓄電池で代替することにより、燃料電池の発電割合が向上する。燃料電池を導入する際、蓄電池による消費電力の平準化を行えば、最も高い発電効率で稼働できるため光熱費の削減効果を向上できる。

表 2 感度解析の計算結果

	電気代 (円/月)	ガス代 (円/月)	光熱費合計 (円/月)	燃料電池の導入による 光熱費削減効果 (円/月)	感度解析による燃料電池の 光熱費の削減効果 (円/月)
燃料電池未導入家庭	10,257	6,512	16,769	-	-
燃料電池導入家庭	2,463	8,294	10,757	6,012	-
比例項 5%削減	2,463	8,166	10,629	6,140	128
比例項 10%削減	2,463	8,036	10,499	6,270	258
定数項 5%削減	2,463	8,201	10,664	6,105	93
定数項 10%削減	2,463	8,108	10,571	6,198	186
発電割合 5%増加	2,057	8,421	10,478	6,291	279
発電割合 10%増加	1,652	8,548	10,200	6,569	557

## 6. おわりに

本稿では、燃料電池動作の線形近似式を提案した。線形近似式により、燃料電池導入時の効果を容易に推定でき、家庭用燃料電池における動作面での課題を明らかにした。線形近似式の感度解析によって、電力に比例する比例項を 5%、10%と削減した場合、それぞれ月間で約 128 円、約 258 円となり、コンスタントに消費する定数項を 5%、10%と削減した場合には、それぞれ月間で約 93 円、約 186 円となり、燃料電池の家庭の消費電力の発電割合を 5%、10%増加した場合、それぞれ月間で約 279 円、約 557 円という結果となった。また、線形近似式から、燃料電池の導入効果を向上させるには、1) 大型燃料電池を複数家庭で共用する CEMS アプローチが有効であり、2) 単一家庭では、蓄電池の蓄電・放電を用いて、消費電力を 700W に平準化して、10 円/1kWh 程度の安価な燃料電池の余剰電力を生かすべき事を導いた。

## 参考文献

- [1] 大阪ガス, 大阪ガスの家庭用固体酸化物形燃料電池 (PEFC) システム  
<http://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/pefc/index.html>
- [2] 大阪ガス, 大阪ガスの家庭用固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システム  
<http://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/sofc/index.html>
- [3] 大阪ガス, エネファーム typeS 取扱説明書
- [4] 新エネルギー財団 (NEF), 固体酸化物形燃料電池実証研究成果報告会, pp.96  
<http://www.nef.or.jp/sofc/share/pdf/h22y.pdf>
- [5] 大阪ガス, エネファームの経済性  
[http://home.osakagas.co.jp/search\\_buy/enefarm/about/economy.html](http://home.osakagas.co.jp/search_buy/enefarm/about/economy.html)
- [6] 大阪ガス, 一般料金体系  
<https://www5.osakagas.co.jp/custserv/ryokinhyo1001.html#keisan>
- [7] 関西電力, 従量電灯 A 単価表  
[http://www1.kepco.co.jp/ryoukin/dento\\_a.html](http://www1.kepco.co.jp/ryoukin/dento_a.html)
- [8] 大阪ガス, エネファームの仕組み  
[http://home.osakagas.co.jp/search\\_buy/enefarm/about/energysaving.html](http://home.osakagas.co.jp/search_buy/enefarm/about/energysaving.html)
- [9] 大阪ガス, マイホーム発電料金  
[http://home.osakagas.co.jp/price/menu/profitable/p\\_01.html](http://home.osakagas.co.jp/price/menu/profitable/p_01.html)