特集「第6回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

研究論文

LCA視点によるBio-H₂を燃料とする
PEFCスマートフォンの導入可能性評価

堂脇 清志・保元 香奈子・Ivan Prasetya TANIMUKTI

A Feasibility Study on the PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)
Smartphone Operated by Bio-H₂ Fuel using LCA Methodology

Kiyoshi DOWAKI, Kanako YASUMOTO and Ivan Prasetya TANIMUKTI

Synopsis:

Objective. In recent years, hydrogen fuel is extremely expected as one of solution for global warming protection. Especially, in the near future, the bio-hydrogen fuel (Bio-H₂) due to biomass feedstock which is carbon-neutral would be promising as an eco-friendly fuel. Also, the Bio-H₂ production system through the biomass gasification process of Blue Tower process was developed as the commercial plant (15 t-dry/d) in Fukuoka, Japan. That is, it might be close for the eco-friendly fuel to be marketed. On the other hand, the market of smartphone grew and the annual sales recorded around 0.3 billion units. Thus, as one candidate of the device for which Bio-H₂ would be available, we focused on the smartphone with a PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) unit as an alternative to a Li-ion battery, and estimated the primary energy consumption and/or the direct and indirect CO₂ emissions using LCA methodology. In this paper, we investigated the influences of duration time and/or electricity consumption for each functional operation including the effect of exchange from a conventional cell phone to a smartphone. For instance, using the questionnaire on the usability of smartphone, we investigated the user condition in each generation which covered under 20's to over 50's. In comparison to the previous study, we clearly confirmed that the duration time was expanded. Also, we measured the operating electricity consumption of smartphone by the power meter, and investigated the PEFC performance through the basic experiments. Using the above research results, our purpose is to analyze the CO₂ abatement benefit of the smartphone with a PEFC unit fueled by Bio-H₂ against the conventional one with a Li-ion battery.

Results and Discussion. We evaluated the electricity consumption of talking, music, SMS (Short Mail Service), e-mail and internet access, which we intended in our study, and estimated the Bio-H₂ consumption for every operating period (OP) and for users categorized by each generation. For instance, the electricity consumption of under 20's which is the largest value is 2.63 kWh/OP of OP=2.6 years and 3.74 kWh/OP of OP=3.7 years, respectively. Based on these results, on the Bio-H₂ consumptions in the cases of OP=2.7 years and OP=3.6 years, we estimated 0.98 to 1.49 Nm³/OP and 1.39 to 2.12 Nm³/OP, respectively.

On the other hand, assuming the specific CO₂ emission of Bio-H₂ was 34.7 to 90.4 g-CO₂/MJ, the CO₂ abatement on direct emission would be approximately 60.4% to 86.8% in comparison to the conventional smartphone. In addition, we have a potential to obtain CO₂ reduction benefit in the total CO₂ emissions including the indirect one, even if the operating period is shorter. This would be due to the expansion of operating time for internet access and the higher efficiency of PEFC performance.

Conclusions. Due to the increase in energy consumption due to more convenient operations of a smartphone such as internet access and a higher performance of PEFC unit, the CO₂ reduction benefit against a conventional phone would be significantly obtained by the PEFC smartphone fueled by Bio-H₂.

Keywords: Bio-H₂; Li-ion battery; PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell); smartphone

堂脇 清志・Ivan Prasetya TANIMUKTI / 東京理科大学 / 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

保元 香奈子 / 東京理科大学(現: いすゞ自動車株式会社) / 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

Kiyoshi DOWAKI, Ivan Prasetya TANIMUKTI / Tokyo University of Science / 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

Kanako YASUMOTO / Tokyo University of Science. Currently, ISUZU MOTORS LIMITED / 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

1. はじめに

近年、高速通信技術、高性能ディスプレイ、ワンセグ等の更なるアプリケーションの搭載等の付加機能に伴い、モバイル機器の導入が進みつつある。特に、電気通信事業者協会（TCA）による2011年5月末時点の携帯電話及びPHSの契約数の発表によれば、携帯電話の契約数は約1.2億件となっている¹⁾。また、米調査会社ガートナー社が2010年の携帯電話機販売台数をまとめたレポートによると、昨年全世界で販売された携帯電話機の台数は16億台であり、そのうちスマートフォンが約3億台を占めており²⁾、今後とも当該機器の市場拡大が予測されている。このような状況は、発展途上国などの新興国においても市場拡大が予想され、例えば、東南アジア地域の1つであるインドネシアにおいては、日本よりも普及台数が多い水準となっている³⁾。

このような背景とは逆に、既存の携帯機器の駆動源であるLi-ionバッテリーの電池容量の伸びは、多機能化に対する消費電力の増加に対応しきれていないとの見方があり⁴⁾、我が国においても、電池切れに伴う各機能サービスの低下の防止（省電力対策）などの措置が講じられてきている。また、当該機器におけるCO₂排出抑制に対する懸念もあることから、今後も各関連メーカーが消費電力の削減や温暖化対策の必要性が向上するものと考えられる。このような対策の一環として、携帯電話に燃料電池を搭載させたものやLi-ionバッテリーを内蔵した各モバイル機器への電力供給を行うための携帯機器用充電器にPEFC（Polymer Electrolyte Fuel Cell）を中心とするマイクロ燃料電池を搭載させた研究が進みつつある。いずれも小型化、薄型化が可能なパッシブ型のDMFC（Direct Methanol Fuel Cell）を用いた研究が主流であるが^{5, 6)}、後者に関してはNTTドコモがアクアフェアリーと共同開発でPEFCを用いたものを開発している。また、東芝がDynarioというDMFCを用いた携帯機器用充電器を商品化し、2009年10月に3000台限定で販売したという実績がある。

このような当該機器の販売普及には、最初に技術的なシーズの検討、続いて、ニーズの調査及びビジネスモデルの確立等の検討を行い、最後に、ニーズや市場に即した研究開発の実施が必要であると考えられる。また、今後の世界的な多機能携帯の普及予測から、省エネあるいは代替エネルギーによるエネルギーシステムの検討が必要と考えられよう。

以上の背景より、これまで筆者らは、今後の消費電力抑制ならびにCO₂削減対策の1つの方法として、従来機器より高効率な電力供給が可能である燃料電池（PEM-Cell）に着目し、さらにCO₂削減を目指すために、駆動用エネルギー源として低炭素燃料を利用した場合のCO₂削減効果について、燃料電池の運転特性に係る実験及びユーザーに対

する利用時間等の結果に基づいた検討を実施してきた⁷⁾。この分析により、これまでの携帯電話における直接CO₂削減量と間接CO₂排出量の比について着目し、Li-ionバッテリーの携帯機器に比べたときのCO₂削減するための条件を整理してきた。

この結果を踏まえ、本研究では、さらに、インターネット接続機能、音楽や動画などの比較的大容量で多様なフォーマットに対応するスマートフォンについて、その機能別電力消費量を評価し、また年代別の利用形態の違いを勘案するために、アンケートによる使用状況を調査した。また、それらの結果を反映させた条件を整理して、スマートフォンに燃料電池を搭載させたシステムについて、各条件に対するシステム分析を行うこととした。このような背景の1つに、従来の携帯電話からスマートフォンへの移行に伴い、利用頻度の向上及び消費電力の増加が見込まれ、PEFCなどの発電効率の高い電力供給機器のポテンシャルが増してきていること、また、前述したように、今後の新興国への導入普及が見込まれること、さらに、燃料電池の技術開発あるいは導入実績の増加により、価格低下が見込まれることや水素吸蔵合金といった燃料貯蔵の技術開発が進んできたことにあり、携帯機器だけでなくPCやPDAに対しても検討されてきていることによる。

2. 評価方法

これまで筆者らの研究では、本研究で対象とするようなPEFC携帯機器について、ユーザーへのアンケートによる利用者特性を考慮し、a. バイオマスから製造されたBio-H₂利用時の直接CO₂排出量の検討、及びb. 機器製造時の間接CO₂排出量を含むBio-H₂利用時のCO₂削減便益が得られる条件整理を行ってきた。ここで、a. で想定しているBio-H₂はBlue Towerプロセスと呼ばれるガス化炉によるシステムで得られるものであり、これまでは当該技術によるプロセス設計でのデータを用いてきた。さらに、本研究においては、Bio-H₂製造プラント（15t-dry/d）が現在、福岡県大牟田市において、商用化施設として導入が進められているシステムがあるため^{8, 9)}、本研究におけるLCAにおいても、当該関連データの反映による具体的なデータを用いることにより、従来のエネルギー供給（電力）との比較が、より現実に近い、あるいはより公平性に富んだ形での分析を行うことが可能となった。

ここでは特に、バイオマス資源として杉廃材を原料とした再生可能エネルギー資源からのH₂燃料によるライフサイクル全体における1次エネルギー投入量及びCO₂（LCCO₂）排出量を評価した。また、当該機器に対する導入コストについては、課題が残されているが、将来的には、今後のBio-H₂燃料の普及やその他のスキームの利用によ

りコスト低減が期待できる可能性がある^{10, 11, 26)}。

また、これまでの筆者らの検討においては、Li-ionバッテリーによる従来型携帯機器のCO₂排出量を比較データとして、LCAでのCO₂削減便益が得られるような直接及び間接比率の条件、ならびに使い方について整理してきた。本研究においても、同様な分析を行うことを目的に、スマートフォンの間接CO₂排出量等のデータはないが、これまでの従来の検討結果を参照し整理を行うこととした。すなわち、本研究においては、携帯電話からスマートフォンの機能の充実に伴う消費電力の増加、利用時間の拡大及び保有期間の相違に関する影響を分析することを目的とし、各機能の消費電力を実際に測定し、また、PEFCの性能を実験的に検証することによる詳細な分析によって、バイオマス資源を利用したBio-H₂を燃料とするPEFCスマートフォンの導入可能性について検討した。

まず、Figure 1に本研究の分析フローを示す。正確な利用状況把握のため調査会社によるスマートフォンユーザーに対してアンケートを行い、その結果を用いて、各機能に対する持続時間及び頻度を把握し、使用段階におけるエネルギー消費量の推定とそれに伴う直接分に相当するCO₂排出量の算出を行うこととした。

次に、本研究におけるシステム境界については、Figure 2に示すとおりである。これまで実施したLi-ionバッテリーの携帯機器におけるLCAにおいては、直接CO₂排出量は間接CO₂排出量に比して、非常に小さいことが知られている⁷⁾。しかしながら、本研究のように、より利便性の高いインターネット閲覧のようないくつかの機能を備えているスマートフォンでは、その消費電力の増加により、直接CO₂排出量の比率が増加する可能性がある。また、今後の当該機器の導入のためのインセンティブを考えた場合、直接CO₂排出量と間接CO₂排出量の比率やエネルギー収支比は、重要な指標であると考えられるため、これまでの評価事例と同様に間接CO₂排出量の評価に加え、エネルギー収支比に基づく1次エネルギー投入量の評価を行うこととした。

ここで、1次エネルギー投入量 Ene_I [MJ/MJ] 及びLCAベースでのCO₂排出量 $TotalCO_2$ [kg-CO₂/OP] については、次式のように定義されるものとした。

$$Ene_I = \frac{Feedstock_Q + Ind_Q}{Fuel_Q} \quad (1)$$

$$TotalCO_2 = Fuel_CO_2 \cdot DT + Ind_CO_2 \quad (2)$$

ここで、式中の各変数は以下のとおりである。なお、電

Figure 1. Analysis flow chart

Note:

* Estimated period=2.6 or 3.7 years

** This value is based on the wheel to tank, that is, the input energy for producing the fuel besides raw energy source (primary energy) is considered, too.

***The CO₂ emission is estimated in consideration of "reuse" or without it.

Figure 2. System boundary

力を所内動力として考慮する場合には、直接分のみを扱った。
Feedstock_Q: スマートフォンの供給電力あるいはBio-H₂の燃料を生産するための直接エネルギー量 [MJ] (Figure 2の (1) の部分)

Ind_Q: 間接エネルギー量 [MJ] (Figure 2の (2) の部分)

Fuel_Q: 燃料のエネルギー量 [MJ] (Figure 2の (A) の部分)

Fuel_CO₂: 1保有期間 (OP) 中の単位時間あたりの燃料消費に伴うLCAベースでのCO₂排出量 [kg-CO₂/min]

Ind_CO₂: スマートフォンが実際に利用される期間に対する筐体、及び1OP期間内で使用されるバッテリーに伴う1ユニットあたりのCO₂排出量 [kg-CO₂/unit]

DT: 各機能に利用時間を考慮した1OPあたりの総燃料消費時間 [min/OP]

OP: 1ユーザーが保有する期間 (1OP) [years]

また、1OPの大きさは、近年の携帯機器の使用年数とその影響を鑑み、次のように与えることとした。これまでの携帯機器の平均使用年数の調査では、2008年では2.6年であり、また、将来的な予測として、2013年までには3.7年になると推測されているため^{14, 15)}、ここでもスマートフォンの使用年数については、2.6年 (OP=2.6 years) 及び3.7年 (OP=3.7 years) の2つのケースについて検討することとした。なお、本研究のようにLCAによるCO₂排出量の評価においては、従来のLi-ionバッテリーのスマートフォンにおいては、バッテリーの寿命を考慮する必要がある、

それを踏まえた評価が必要となろう。但し、今後の契約形態や機能の充実度合により、その年数が変わることが予想され、いわゆる不確実性の考慮が必要となるが、ここでは、平均使用年数の不確実性に対する感度分析を行うことにより、その影響を見ることとした。

次に、間接CO₂排出量については、これまでのところ本研究で対象とするBio-H₂によるスマートフォン用のPEFCは商品化されていないため、当該機器の製造に係るインベントリ分析 (LCI) は困難である。そこで本研究では、参考データとしての位置づけで、Takeiらによる同種類の燃料電池を用いているDMFCの携帯機器のLCI分析に関するデータを参照データとした^{12, 13)}。具体的には、これまでの筆者らの分析を参照し、PEFCによるスマートフォンについて、筐体部分、電池及び貯蔵 (カートリッジ) の部分に分けて検討した。

まず、筐体の部分については、これまでのLi-ionバッテリーによるスマートフォンと同じ部品構成を仮定し重量に比例させて、筐体部分のCO₂排出量を求め、これを間接CO₂排出量とした⁷⁾。なお、この間接CO₂排出量の評価方法については、次の点を考慮した。中古情報機器協会によれば、本研究で対象としているスマートフォンも含め、平成20年度では、リユースの台数が2.1千台であったが、平成21年度には、43.1千台と急速に伸びている。この要因としては、平成19年度以降の販売形式の変更や携帯電話の高機能化が進み、携帯電話本体の販売価格が

高額となったことにより、中古携帯電話（リユース）市場が急速に伸びてきていると言われている²⁸⁾。すなわち、本研究で対象としているスマートフォンについても、このような状況も想定され、将来的にはリユースの拡大も想定される可能性がある。従って、本研究における筐体部分の間接CO₂排出量の取扱いについては、リユース期間を考慮した間接CO₂排出量の影響について分析することを目的として、本研究で想定しているスマートフォンの利用期間を、さらに2倍だけ利用可能であるとした場合、すなわち、それぞれ5.2年（=2.6年×2）及び7.4年（=3.7年×2）としたときの評価も行った。但し、2期目の使用状況については不確実な部分も多いため、ここでは、スマートフォン本体のみが当該期間だけ使用されると仮定し、その他のバッテリーに対する間接CO₂排出量及び直接CO₂排出量については、IOP期間内のみを考慮することとした。

従って、本研究では、筐体部分の間接CO₂排出量について、想定する期間のみ使用され、その後、廃棄される場合とリユースを考慮した期間のみ使用され廃棄される場合の2つのケースについて、その他のCO₂排出量も含め1ユニットあたりIOPあたりのCO₂原単位を検討することとした。また、これに関連し、さらにリサイクルについても言及すべきであるが、本研究では、スマートフォンの利用を勘案したエネルギー消費に係るCO₂排出の削減方策について、LCAの観点から分析を行い、直接及び間接CO₂排出量の関係を明らかにし、これに基づいてエネルギーの代替の可能性を検討した研究であるため、リサイクルを含めた間接CO₂排出量の削減方策については考慮していない。そのため、リサイクルを含めたCO₂排出量の削減方策についての評価については、今後の検討課題としたい。

次に、電池の部分については、まず、Li-ionバッテリーの場合には、これまでの携帯機器のバッテリーのCO₂原単位に対して、スマートフォンのLi-ionバッテリーの電気容量に比例するものとして算出した。ここでは、これまで筆者らが検討してきた携帯電話（SHARP, W61SH）のバッテリー容量800 mAhから⁷⁾、本研究で対象とするスマートフォン（HTC, HTC Desire SoftBank X06HT）のバッテリー容量1,400 mAhとなるため、その増加分に応じてCO₂排出量を算出した。

一方、PEFCについては、Takeiらの結果をもとに以下のように算出した¹²⁾。本研究で対象としているスマートフォン用のマイクロ燃料電池の開発については、まだ発展段階であるため、LCAベースによるCO₂排出量の検討例はほとんどない。従って、ここでは、従来の検討でも対象とした携帯電話用のDMFCの評価事例をもとに算出することとした。

まず、Takeiらは10 kWhの出力に対し、必要なカートリッジの本数ならびに電池の部分のCO₂排出量を試算している。本研究においては、これらのデータ及びこれまでの検討結果をもとにPEFCとカートリッジ1本について、1WhあたりのCO₂排出量を試算した^{7, 12, 13)}。なお、当該事例でのPEFCの発電出力が現時点で異なる点や燃料の貯蔵（カートリッジ）の部分が異なる点がある等、不確実な部分があるため、ここでは参考データとしての扱いに留めることとしたい。

次に、これらのCO₂排出量に対し、Li-ionバッテリーの寿命及びPEFCの寿命を仮定した分析を行った。すなわち、Li-ionバッテリーの寿命は、充電回数500回を限度とした¹⁶⁾。ここで、充電回数の算出に当たっては、実測した各機能の電気量（=電流×時間）の消費合計を満充電の容量（1,400 mAh）で除すことによって充電回数を求めた。さらに、これをIOPあたりの充電回数に換算し、IOPあたりに必要なバッテリー数を求めることとした。

また、PEFCの寿命については、現在、導入が進められている定置型燃料電池と自動車用燃料電池との寿命には大きな差があるが、マイクロ燃料電池の充電器の寿命や燃料電池のロードマップを参考にし、ここではLG chem社の10,000 Whを寿命として想定することとした¹⁶⁻¹⁸⁾。すなわち、IOPあたりのエネルギー消費量 [Wh] を10,000 Whで除すことによって、IOPあたりの燃料電池のユニット数を求めることとした。

最後に、使用段階におけるエネルギー消費量及びCO₂排出量（直接CO₂排出量）は、Li-ionバッテリーについては、実測したデータを一般電力の送電端効率及びCO₂排出原単位を用いることとした。また、PEFCスマートフォンに関しては、その性能（H₂燃料消費量）を、従来のLi-ionバッテリーの開回路電圧を勘案した複数のPEM-Cellを用いることによって、PEFCのI-V（電流-電圧）特性を測定し、測定された燃料電池の発電特性を回帰式によってデータフィッティングすることで、PEFCの利用を想定した場合の使用段階におけるH₂使用量及び直接CO₂排出量を算出することとした。なお、ここでは、セル面積の影響は無視できるとして評価した。

以上の仮定をもとに、LCAベースでのPEFCスマートフォンのCO₂排出量を分析し、今後の当該機器の開発において重要な指標の1つとなる直接及び間接CO₂排出量を含めた従来型のLi-ionバッテリーのスマートフォンに対するCO₂削減便益を検討した。なお、従来型及びPEFCのスマートフォンについては、廃棄段階のLCIを明示することは困難なため、本評価においてはその範囲から除外した。また、実際の機器の製造や廃棄に係るLCIについては、今後の開発動向や実用化を踏まえ、検討することとしたい。

3. スマートフォンの利用者特性に関するアンケート

一般に、新たな製品の導入や技術の利用、特に、ハイテク機器においては、一定規模の初期利用者が必要であるとされている。また、近年のスマートフォンユーザーは契約形態や初期コストなどの要因から、使用頻度や利用する特性が異なることが想定される。本研究の1つの目的である環境負荷評価の観点から、ある程度、区分されたユーザーに対する利用特性を把握することは非常に重要である。そこで、本研究ではアンケートにより、ユーザーの利用状況の特性について、その把握を行った。すなわち、既存のLi-ionバッテリーのスマートフォンを使う際の消費電力量を把握し、また、直接CO₂排出量を算出することを目的にアンケートを行い、年代別のスマートフォンの利用状況特性から消費電力量を導くこととした。

3.1 アンケート概要

これまでの筆者らが実施した研究成果をもとに、本研究では、次のようなアンケートを実施した⁷⁾。

<アンケート概要>

対象：全国を対象とする15～20歳、20歳代、30歳代、40歳代、50～69歳のスマートフォンユーザー（回答者は主に首都圏、中部圏及び関西圏が中心である。）

対象人数（有効回答数）：200人

方法：調査会社によるインターネット調査

実施期間：2011年2月16日～22日（1週間）

主な調査項目：平日・休日別の1日あたりの機能別利用時間（通話（Talking）、音楽再生（Music）、ゲーム（Game）、SMS、メール操作（e-mail）及びインターネット閲覧（Internet））

ここでのアンケートは、主に、男女比率が2:1、各年代に対して比較的使用頻度の高いユーザーの使用状況を把握するために、自営業（6.5%）、会社員（55.5%）、公務員（5.0%）、学生（14.5%）、専業主婦（夫）（7.5%）及びその他の職業区分からデータを得ることとした。

ここで、集計結果をFigure 3に示す。この結果から、平日休日ともに、インターネット閲覧の利用時間が最も長い結果となった。また、平日では、20歳未満における通話のみが他の年代の利用時間に比して長くなる傾向であり、一方、休日においては、通話、音楽再生及びインターネット閲覧における20歳未満の利用時間が他の年代に比べ長くなるという結果が得られた。さらに、これまでの携帯電話の利用時間の結果と比べた場合、特に、音楽再生、ゲーム及びインターネットの閲覧が、約数倍から数十倍単位の大規模な時間増加になっているという結果となった⁷⁾。なお、ここでの各機能の利用時間については、各年代での平均値とし、その他の機能である待ち受け（Stand-by）時間につ

(a) Weekday

(b) Holiday

Figure 3. Duration time of smartphone operation in each generation

いては、スマートフォンが常時稼働している状態で充電することを仮定し、1日あたりの時間間隔（1,440 min）から各機能の時間の合計を差し引いた時間とした。また、これらの機能区分をベースにして、次節の電力消費量の測定を実施した。

3.2 スマートフォンの各機能の電力消費量

次に、前節のスマートフォンの利用時間及び利用区分における電力消費量を把握するために、ここでは、以下の測定を実施した（Figure 4参照）。

<実験装置の概要>

スマートフォン：HTC Desire SoftBank X06HT

バッテリー種類・電気量・開回路電圧：Li-ion battery・1400 mAh・3.7V

測定機器：AC/DC パワーハイテスタ 3334（日置電機株式会社）

Figure 4に示される測定システムをベースにして、スマートフォンにおける通話、音楽再生、ゲーム、SMS、メール操作（e-mail）、インターネットの閲覧及び待ち受けの項目について、各機能に対する電流及び電圧を測定し、電力量及び電気量を評価した（Figure 5参照）。なお、各機

Figure 4. Schematic drawing of measurement system on smartphone energy consumption

能の測定において、メール操作、SMS及び待ち受け以外の各機能の測定においては5分間で10回ずつ測定し、その平均値を各機能の測定結果として以下の分析に用いることとした。また、メール操作とSMSについては、メールの閲覧、メール作成及び送信の一連の動作の測定を行い、さまざまな長さの一連の作業時間（1分未満～10分相当）を行い、これを単位時間あたりの平均値で評価し、さらに測定回数で平均した値を用いることとした。さらに、待ち受けの電力消費については、24時間の連続測定を行い、また、平日と休日の待ち受け時間が異なるため、平日休日別の待ち受け時間相当の電力消費量の合計から、単位時間あたりの電力消費量を求めた。ここで、各機能の電力消費の標準偏差は、通話 (0.210 W)、音楽再生 (0.120 W)、ゲーム (0.132 W)、SMS (0.062 W)、メール操作 (0.136 W)、インターネット閲覧 (0.166 W) 及び待ち受け (平日及び休日ともに0.092 W) となった。

以上から、各年代別の1人あたり1日あたりの電力使用

量の結果をFigure 6に示す。なお、本研究においては、前述したようにスマートフォンの保有期間（1OP）を26年及び3.7年の2つのケースについて検討した。この結果から、20歳未満の1OPでの電力消費量が最大となり、それぞれ2.63 kWh/OP (OP=2.6 years) 及び3.74 kWh/OP (OP=3.7 years) となった。これは、通話及びインターネットの閲覧の利用時間が多いことによる。また、1OPが26年から3.7年に増加することにより、各年代とも1 kWh以上の増加が見られた。さらに、従来の携帯電話との比較においては、どの年代においても電力消費量が増加し、同一の保有期間（2.6年）の場合で比較した場合、1.25～2.06 kWh/OPの増加となり、従来の携帯電話からスマートフォンへの移行が、その機能の充実や利便性の向上により、電力消費量を増加させることの要因であることが示唆された⁷⁾。但し、本評価においては、前述したように、スマートフォンの電源は常にオンの状態であることを仮定した評価になっていることに注意されたい。

Figure 5. Measurement results on smartphone energy consumption

Figure 6. Energy consumption for each function per 1 OP

4. スマートフォン PEFCによる I-V特性の把握

次に、前節で評価した電力消費量に対して、燃料電池の搭載を仮定した評価を行った。当該評価については、これまで筆者らが実施した実験方法に基づき、PEFC (固体高分子形燃料電池) を想定し、この電池を用いたときのI(電流) -V(電圧) 特性を評価した。最終的には、この結果を用いて、各機能に対する燃料消費量を算出し、それに伴うエネルギー消費量やCO₂排出量削減の検討を行った。なお、ここでは、PEFCの燃料として、今後、商用化による導入促進が期待されているBio-H₂を想定した実験を行った⁷⁾。Bio-H₂燃料は、廃木材を中心とするバイオマス資源をBlue Towerと呼ばれる分散型ガス化システムによりガス化され、その得られた高濃度H₂を主成分とする合成ガスをシフト反応器及びPSA (圧力スウィング吸着方式) により濃縮された4N-H₂ (濃度: 99.99%) の純水素の燃料を想定している^{19, 20)}。

また、使用する燃料電池については、スマートフォンへの適用が可能であると想定されるマイクロ燃料電池の1つであるPEM-Cellを用いた。なお、一般的にはセルの開回路電圧については、理論的には25℃のとき1.23 Vであるので、当該実験においては、既存のLi-ionバッテリーの電池の起電力 (3.7 V) を参考にして、2 cm×2 cmセル3枚 (3スタック) を組み合わせた実験を行った。また、これらの測定結果 (I-V特性) については、Kimらのモデルによりデータフィッティングし、これにより各機能で消費する電力に対する部分負荷特性を考慮した燃料消費量の分析を行った²¹⁾。

ここで、当該実験の概要については、以下のとおりである。

<実験装置の概要>

燃料電池の種類: 固体高分子燃料電池 (PEM-Cell) (株式会社 メガケム)

セル面積: 4 cm² (2 cm×2 cm) (3スタック)

固体高分子膜: Nafion 115

測定機器: ポテンショスタット HAB-151 (北斗電工株式会社)

ガス種類及び流量: カソード (空気)

アノード (H₂: 12 ~ 20 mL/min)

ここでの実験では、雰囲気温度 (室温) が23.6℃のもと、カソード側は大気中に解放し、アノード側のみを流量計によりH₂供給量を一定量制御し、セル電圧が開回路電圧から0V付近まで変化させたときの電流密度の測定を行った。また、この実験結果を用いた分析においては、まずH₂供給量による流速が起らない条件で流量の供給する、すなわち、理論H₂消費量よりも過剰なH₂量を供給することによって、その結果からI-V特性を (3) 式により評価した²¹⁾。

$$V = V_0 - RJ - b \ln J - m \exp(nJ) \quad (3)$$

ここで、

V: セル電圧 [mV]

V₀: 起電力 [mV]

R: セル抵抗 [Ohm-cm²]

J: 電流密度 [mA/cm²]

b: Tafel勾配 [mV/decade]

となり、また、m及びnは係数であり、それぞれの単位は、[mV] と [cm²/mA] である。

本研究では、各流量の測定結果から、出力が飽和となる流量 (20 mL/min) を評価し、このI-V特性から (3) 式に基づく回帰式 ((4) 式参照) を評価した。なお、r²は測定データとの決定係数を表す。

$$V = 2824 - 8.35J - 217 \ln J - 132 \exp(-0.066J) \quad r^2 = 0.991 \quad (4)$$

次に (4) 式に基づき、想定しているPEFCの運転電圧及びセルの面積を以下のように決定した。(4) 式の結果によれば、セルの開回路電圧は、約2.8 Vと現状のLi-ionバッテリーの起電力 (3.7 V) に比して低い値となった。このため、商品化されているLi-ionバッテリーとのスマートフォンの各機能の電力消費量に対する比較評価ができない。従って、ここでは、Li-ionバッテリーの能力とほぼ同等とするために、セルスタックの影響はないものとして、もう1枚のセルを考慮したPEFCを想定することとした。すなわち、(4) 式を3分の4倍し、想定しているPEFCのセル起電力を3.77 Vとして評価することとした。

一方、セルの面積S [cm²] については、(4) 式から電圧及び電力量 (電流×電圧) の関係から、最大出力となるセル電圧を評価し、このとき、前節で測定したスマートフォンにおける最大電力必要量を十分に満たす面積を本評価におけるセル面積として決定した。ここで、出力が最大となるセル電圧を (4) 式により、1セルあたり0.4 Vとし、このとき、最大出力2.11 W (インターネットの閲覧) を満たすセル面積として、16.4 cm²と評価した。なお、このときの出力密度は129 mW/cm²となり、例えば、2007年の水準では、セル電圧が0.4Vのときに出力密度が50 ~ 100 mW/cm²及びセル面積10 ~ 20 cm²は可能であるとしており²²⁾、また、現在のマイクロ・ポータブル用PEFC出力密度の技術水準が200 mW/cm²であることから²⁶⁾、当該評価値もある程度実現可能な水準であると判断される。

その他、各機能における電流密度J [mA/cm²] についても、セル面積及びスタック数を固定し、(4) 式から計算される電力量 (=JVS) と実測された電力量とが一致するように求めた。なお、実際のセルのスタック数及びセル面積

に関しては、スタックによる影響も考慮し、今後のPEFCの開発状況を勘案し決定することとしたい。

次に、実際のH₂流量については、理論H₂流量との比（ストイキ比）を考慮する必要がある。例えば、中島の小型燃料電池を用いた電圧、出力及びストイキ比との検証結果においては、セル温度40℃及びストイキ比が1.25のときに電圧及び出力が最大となるという報告がある²³⁾。しかしながら、スマートフォンのようにマイクロ燃料電池を利用する場合、H₂燃料の貯蔵方法については効率性が求められ、水素吸蔵合金による貯蔵を仮定したとしても、取扱いの利便性を考えれば、実際に消費する燃料分だけを供給すること、すなわち、ストイキ比が1の場合が求められよう。この場合、アノード側はデットエンド方式になり、H₂の消費に従い不純物（水）が蓄積する可能性があるが、既存のLi-ionバッテリーの満充電相当（5.18 Wh）のH₂消費量（低位発熱量：10.8 MJ/Nm³）が約1.7 NLであり、また、ここから発生する水分が1.4 g程度である。この生成水は電池内部でガス流路に滞留すると、空気や水素の供給を阻害するためフラッドイングと呼ばれる性能低下現象を起こす可能性がある。一方、液体の生成水は電解質膜の湿潤にも使われるため、この生成水が少なすぎると電解質膜が乾燥してしまうため、発電性能が低下することもある²⁴⁾。従って、本研究においては、その影響は無視できるものとして扱うこととした。但し、H₂燃料の供給方法、貯蔵方法及び水分発生に対する発電への影響の有無については、今後の研究課題としたい。

以上の検討結果から、次式により各機能の利用時間に対するH₂消費量F_{ME} [NmL/OP] が得られる。

$$F_{ME} = \frac{JSRT}{zF_C P} \times \text{Time}_i \quad (5)$$

ここで、

S：実験で用いたセル面積（=16.4 cm²）

F_C：ファラデー係数（=96,485 c/mol）

R：気体定数（=8.314 m²kg/s²molK）

z：反応に寄与する燃料分子1mol当たりの電子数（=2）

T：温度 [K]（=273.15 K）

P：圧力 [Pa]（=1010325 Pa（大気圧））

Time_i：1OPあたりのi機能の持続時間 [sec/OP]

である。このとき、(5) 式より各年代1OPあたりの全体のBio-H₂消費量は、0.98 ~ 1.49 Nm³（OP=2.6 years）及び1.39 ~ 2.12 Nm³（OP =3.7 years）となった。

このBio-H₂消費量の結果から、スマートフォンの年代別利用者特性を考慮したエネルギー消費量及びCO₂排出量の評価を行うこととした。

5. Li-ion battery / PEFC スマートフォンのエネルギー消費量・CO₂排出量の算出

次に、3.で求めた各年代における電力消費量及び(1)式から、使用段階における1OPあたり、及び機能別のエネルギー消費量を算出し、また、間接CO₂排出量については、前述した仮定に基づく(2)式により1OPあたりのCO₂排出量を算出した。なお、充電のために用いる電力のエネルギー消費量（1次エネルギー換算）及びCO₂原単位は、我が国の一般電力の値を用いることとした²⁵⁾。一方、Bio-H₂のエネルギー消費量及びCO₂原単位については、最新のBio-H₂製造システムの設計をベースに、これまで筆者らが検討してきた評価方法にて算出した^{9, 11, 25)}。特に、これらの値では、バイオマス原料の収集（5-20km）及び含水率（20-50wt.%）について、それらの不確実性について考慮されているため、幅を持ったエネルギー消費量及びCO₂原単位となっている。

ここで、本研究で想定している燃料のエネルギー消費量及びCO₂原単位をTable 1に示す。

Table 1. Data of fuel energy and CO₂ emissions

Fuel	Energy [MJ/unit#]	CO ₂ [g-CO ₂ /MJ]	Note
Biomass (Japanese Cedar)	13.23	0	at 20 wt.% (moisture content) #Unit: kg
Diesel Oil	35.5	79.82	#Unit: L
Electricity	2.87 * (0.26 **)	123.1* (104.2 **)	*:direct intensity **:indirect intensity Net power eff.=34.8% #Unit: MJ
Bio-H2	2.57 * (0.87-1.57 **)	0.0 * (34.7-90.4**)	*:direct intensity ():indirect intensity Lower heating value:10.8MJ/Nm ³ #Unit: MJ

5.1 1OPでの1次エネルギー量

前述の結果を用いて、(1)式に基づいた1OPあたりのエネルギー投入量を計算した。ここでは、前述したようにBio-H₂燃料については、バイオマス資源の不確実性を考慮しているため、その上下限も評価することとし、また、OPの違いについても検討することとした (Figure 7参照)。また、各年代及び各OPのうち左側の棒グラフ (上下限値が示されているグラフ) がBio-H₂によるPEFCスマートフォンの結果である。

この結果から、原料の回収距離が小さいことによる輸送部分のエネルギー消費量の低減効果や、原料の低含水率によるBio-H₂の生成効率の向上など、原料の収集も含めた生産条件が良ければ、OP=2.6 years及びOP=3.7 yearsのいずれのケースにおいても、すべての年代で従来方式のLi-ionバッテリーのスマートフォンより1次エネルギー投入量が低く抑えられることが示唆された。また、1次エネルギー消費削減率 (平均値) で見た場合、特に、20歳未満の年代において、その削減率が最も大きく (約10.7%)、一方、最も小さい世代は40歳代 (約2.6%) となった。このことから、インターネット閲覧等によるエネルギー消費量の大きな世代に対して、高効率のPEFCスマートフォンの導入効果がある程度期待できることが言えよう。

5.2 利用者特性を考慮したLCAベースでのCO₂排出量

次に、スマートフォンを使用した場合のCO₂排出量を筐体及びバッテリー部分の間接CO₂排出量を考慮した評価を行った。

ここでは、スマートフォンの筐体ならびにバッテリーあるいはPEFCの間接CO₂排出量については、前述したように、電池の交換を考慮した分析を行った。但し、ここではバッテリー及びPEFCの交換に伴うエネルギー消費に関するCO₂排出量については考慮されていないことに注意されたい。

Note: The error bar at the left side in each OP result shows the deviation on the uncertainties in Bio-H₂ case.

Figure 7. Primary energy consumptions in each generation

(a) Reused smartphone

(b) Discarded smartphone

Note:

The error bar at the left side in each OP result shows the deviation on the uncertainties in Bio-H₂ case. Description of each case is as follows;

(a) It is assumed that the smartphone is reused only twice at intervals of 2.6 or 3.7 years.

(b) Discarded smartphone: It is assumed that the smartphone is discarded after the user used that up in life span of 2.6 or 3.7 years.

Figure 8. Indirect and direct CO₂ emissions in each generation

Figure 8は、間接CO₂を含めて、従来型のLi-ionバッテリーのスマートフォンと本研究で提案しているBio-H₂を燃料とするPEFCスマートフォンとの結果を示したものである。なお、図中 (a) は、各年代において、リユースを仮定した場合であり、(b) は使用年数が経過後に廃棄される場合の結果である。また、各年代及び各OPのうち左側の棒グラフ (上下限値が示されているグラフ) がBio-H₂によるPEFCスマートフォンの結果である。さらに、図中のDirect emissionは燃料 (電力またはBio-H₂燃料) 消費に伴うCO₂排出量のことであり、Indirect emissionは、筐体やバッテリーまたは燃料電池 (カートリッジを含む) に係るCO₂排出量を指す。

まず、この結果において、Li-ionバッテリーの交換が必要な年代は、いずれのOPケースでも充電回数の制限を超えてしまうので、すべての年代で交換が必要となり、最も多く必要となる年代は20歳未満であり、いずれのOPにおいても2~3個必要となる。一方、PEFCについては、OP=2.6 years及びOP=3.7 yearsにおいては、1OP期間内の全電気量が最も大きい20歳未満でも、OP=3.7 years

のときで6,347 Whであるので、いずれの年代でも交換の必要がないという結果となった。なお、Li-ionバッテリーが複数個必要な場合であっても、間接CO₂排出量は使用する電氣量に応じたCO₂排出量となっていることに注意されたい。また、この仮定でのLi-ionバッテリーとPEFCのスマートフォンの間接CO₂排出量は、Li-ionバッテリーの場合に比して約1.1～1.5倍となった。

この図から、従来のLi-ionバッテリーによるスマートフォンに比して、間接CO₂排出量を含めたCO₂削減率は、リユースを考慮した場合で3.4～7.3%、リユースを考慮しない場合でも1.8～3.9%となり、リユースをした方が間接CO₂排出量の負担が減少することにより、PEFCへの代替効果が増加する傾向が期待されよう。また、最も効果のあった年代はいずれの場合でも20歳未満であり、逆に、CO₂削減効果が最も小さい年代は40歳代であった。

次に、本研究と同様な評価方法で検討してきたこれまでの携帯機器の結果と比較した場合、リユースを考慮した場合であっても消費電力の少ない携帯機器では製造に関する間接CO₂排出量が大きく、また、全て年代において従来との大きな差が見られなかったことに対し⁷⁾、PEFCスマートフォンを導入した場合では、Bio-H₂のCO₂原単位の大きさにもよるが、リユースを考慮しなくても全ての年代に対してCO₂削減効果が見られる可能性が示唆された。これは、直接CO₂削減量と間接CO₂排出量の比が、従来の携帯機器にBio-H₂を燃料とするPEFCを導入した場合では1:152～301であったのに対し、スマートフォンの場合では、機器本体の利用期間の扱いが異なるが、インターネット閲覧等の利用時間が延びることにより、エネルギー消費量が増加し、その結果、OP=2.6 yearsの場合で1:31～125、OP=3.7 yearsでは1:24～89となり、低炭素燃料の利用の意義が大きくなる可能性がある。なお、直接分のCO₂削減率、すなわち、一般電力からBio-H₂への代替効果によるCO₂削減率は、60.4～86.8%となる。しかしながら、前述したように本研究においては、機器製造の部分については、DMFCのデータを用いており、その意味では、製造部分の間接CO₂排出量に不確実性があると考えられる。特に、DMFCの検討結果においても、燃料のカートリッジの部分のCO₂負荷が大きく、本研究のようにBio-H₂を利用する場合においても、貯蔵の方式（例：水素吸蔵合金）により、間接CO₂排出量に影響を与える可能性がある^{12, 13)}。

以上の分析のように、本研究では、現在は開発途中であるPEFCスマートフォンのLCAを実施してきた。このようなスマートフォンなどのモバイル機器へのPEFCの適用は、燃料電池の技術の確立と同時に、Bio-H₂のような低炭素燃料の貯蔵及び供給が可能となれば、将来的にはバイオマス等の低炭素資源からの水素利用という1つの持続可能

なシステムが確立されよう^{7, 26)}。また、今後のユビキタス社会に対し、関連するマイクロ燃料電池の市場は、2010年は2.4億円程度、2025年は3,185億円と予想されており、また、低コスト化と小型化により、一部の携帯機器での標準採用やオプションに採用され、市場が拡大することが予想されており、このような状況を鑑みれば、今後、本研究で検討した低炭素燃料(Bio-H₂)を燃料とするPEFCスマートフォンの導入可能性の検討は非常に重要であると思われる²⁷⁾。

6. おわりに

本研究においては、従来の筆者らのLi-ionバッテリーの携帯機器と将来にその導入が期待される燃料電池携帯機器のCO₂排出量等の検討結果に対し、さらに、従来の携帯機器とは、エネルギー消費量が大きく異なるスマートフォンに対して、その導入可能性の検討を行った。特に、利用者特性を年代別に考慮し、また将来的に期待され、かつ環境にも貢献する可能性があるBio-H₂を燃料とするPEFCスマートフォンの導入について、実際に利用される機能の電力消費量を勘案した分析を行った。その結果、エネルギー消費量あるいはCO₂削減率については、Bio-H₂燃料を利用する場合においても、1OPあたりの1次エネルギー投入量が、一般電力による1次エネルギー投入量よりも少ない可能性が示唆された。また、使用サイクルが他の家電機器と比べ、2.6～3.7年と短い当該機器の場合であってもCO₂削減便益を得る可能性がある。このことは、今後の当該機器の実現が、燃料電池市場の拡大につながる可能性があるのと同時に、今後の導入コストの低減あるいは、性能の向上を踏まえ、日本だけでなく、電力のCO₂排出量が高くバイオマス資源の豊富な地域（例：東南アジア諸国）への導入も大きな意義がある可能性も示唆されよう。なお、本研究で実施したソフト評価を踏まえ、今後の研究方向として、まずは、ラボベースにおいて、木質系バイオマス原料からH₂ガスを合成し、3mm×3mmのマイクロ燃料電池を利用した性能試験を実施し、H₂燃料の特性や燃料電池の貯蔵方法についても検討していく予定である。

（平成23年7月24日受付、平成23年11月19日採択）

参考文献

- 1) 社団法人 電気通信事業者協会, 事業者別契約数, 電気通信事業者協会ホームページ, 入手先 <<http://www.tca.or.jp/database/2011/05/>>, (参照 2011-7-6)
- 2) WirelessWire News, Android端末, 前年比10倍に - 2010年のスマートフォン販売数, 世界で約3億台に (ガーナー調べ), WirelessWire Newsホームページ, 入手先 <http://wirelesswire.jp/Watching_World/>

- 201102101528.html>, (参照 2011-7-6)
- 3) Digital Media Asia, Indonesia: Mobile Penetration, Digital Media Asiaホームページ, 入手先 <<http://comm215.wetpaint.com/page/Indonesia%3A+Mobile+Penetration>>, (参照 2011-7-06)
 - 4) KDDI株式会社, 製品ラインアップ, au by KDDIホームページ, 入手先 <<http://www.au.kddi.com/seihin/index.html>>, (参照 2009-5-01)
 - 5) 久保佳実 (2007): 電子情報通信学会誌, 90(11), 960-965
 - 6) 久保佳実 (2007): 日本イオン交換学会第18回イオン交換セミナー講演要旨集, 東京, 講演7
 - 7) 堂脇清志, 伊澤智也, 坂本和之 (2010): 日本LCA学会誌, 6(3), 259-269
 - 8) Dowaki K. (2007): Renewable Energy, 32(1), 80-94
 - 9) 亀山光男, 小倉伸介, 上内恒, 堂脇清志 (2010): エネルギー資源学会誌, 31(2), 43-50
 - 10) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議 (2006): バイオマス・ニッポン総合戦略, 5
 - 11) 堂脇清志, 江口勉, 大久保保, 玄地裕 (2008): 電気学会C部門特集論文誌, 128(2), 168-175
 - 12) Takei F., Cooray N.F., Yoshida K., Yoshida H., Ebisu K., Suzuki S., Sawatari N. (2005): FUJITSU Sci. Tech, 41(2), 191-200
 - 13) 中村亮, 伊坪徳宏 (2007): 第2回日本LCA学会研究発表会 講演要旨集, 東京, 286-287
 - 14) ROA Holding Inc., 調査レポート移動体通信市場の予測, ROA Holding Inc. ホームページ, 入手先<http://japan.researchonasia.com/report/report_name.html?searchat=&searchstr=&num=249&start=0>, (参照 2009-5-1)
 - 15) 株式会社 MM総研, ニュースリリース 携帯電話端末の買い替えサイクル調査, 株式会社 MM総研ホームページ, 入手先 <<http://www.m2ri.jp/newsreleases/main.php?id=010120090312500>>, (参照 2009-2-1)
 - 16) Wee J.-H. (2007): Journal of Power Sources, 173, 424-436
 - 17) アクアフェアリー株式会社, 製品情報, アクアフェアリー株式会社ホームページ, 入手先 <<http://www.aquafairy.co.jp/technology.html>>, (参照 2011-7-14)
 - 18) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), PEFCロードマップ詳細版, NEDOホームページ, 入手先 <http://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/other/FF/nedooothernewspl ace.2009-02-09.3960481985/nedooothernews.2010-07-14.2342472174/syousai_nenryou.pdf>, (参照 2011-7-14)
 - 19) 堂脇清志, 保元香奈子, 山成素子, 岩井祐太, 西山裕之 (2011): 第6回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 仙台, 170-171
 - 20) Dowaki K., Ohkubo R., Tashima A. (2009): International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI2009), Thailand, BM-04
 - 21) Kim J., Lee S.-M., Srinivasan S. (1995): Journal of Electrochemical Society, 142(8), 2670-2674
 - 22) 中山浩, 堀美知郎 (2006): 電気製鋼, 77(4), 293-300
 - 23) 中島公平 (2008): 財団法人 日比科学技術振興財団 研究報告書, 167-175
 - 24) 前田正史, 磯貝勇児, 塩澤方浩, 手嶋剛, 濱田仁 (2008): デンソーテクニカルレビュー, 13(1), 37-43
 - 25) トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社 (2004): 輸送用燃料のWell-to-Wheel 評価日本における輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書, 73
 - 26) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2008): 燃料電池分野の技術開発ロードマップ改定に関する調査報告書, 48-72
 - 27) 太陽光発電 総合研究所, 富士経済 2025年、世界の燃料電池市場は5兆円超の市場に大きく成長する, 太陽光発電 総合研究所ホームページ, 入手先 <http://www.solar-eco.jp/energy/fc/ps_03241917.html>, (参照 2011-7-22)
 - 28) 一般社団法人 中古情報機器協会 (RITEA), 携帯電話のリユースとリサイクルの健全な普及拡大を目指す「携帯電話のリユース・リサイクル仕分け基準および使用済携帯電話のデータ消去取扱いのガイドライン」の策定について (報道発表), RITEAホームページ, 入手先<<http://www.ritea.or.jp/100630.pdf>>, (参照 2011-9-1)