

開発途上国における電化事業のビジネスモデル評価

— 評価手法開発とバングラデシュにおけるケーススタディ —

東京大学 工学系研究科 技術経営戦略学専攻 新井 元行

東京大学 工学系研究科 システム創成学専攻 田中 謙司

東京大学 総括プロジェクト機構 Bagheri Behgol

東京大学 工学系研究科 技術経営戦略学専攻 阿部 力也

東京大学 工学系研究科 技術経営戦略学専攻 茂木 源人

要旨

近年、開発途上国において、太陽光発電を利用した分散型電力システムによる電化事業が注目されているが、消費者・事業者の経済破綻により継続的に運用されていないケースが多い。本研究では、持続的な電化事業計画のため、消費者の購買能力および地理的・時間的要因を捉えて事業評価を行う手法を開発し、最貧国のひとつであるバングラデシュを対象として、複数の電化ビジネスモデルの経済性評価を行った。その結果、継続的運用を可能とする電化事業として、太陽光発電を利用するマイクログリッド構築を積極的に展開すべきことが分かった。

キーワード

開発途上国, 電化事業, 事業評価, 分散型電力システム, 太陽光発電

Evaluation Model for Electrification Business in Developing Country

—Building Up Evaluation Methodology and Case Study in Bangladesh—

Motoyuki Arai*¹, Kenji Tanaka*², Bagheri Behgol*³, Rikiya Abe*¹, Gento Mogi*¹

*¹ Department of Technology Management for Innovation, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

*² Department of System Innovation, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

*³ Organization for Interdisciplinary Research Project, the University of Tokyo

Abstract

Electrification business with distributed power system using solar power generation is focused recently in developing countries. On the other hand, there are many failure cases that the business cannot be continued, because of bankruptcy of the user or the business operator. In this study, an evaluation method which considers user affordability and geographical/temporal factors is developed for planning a sustainable electrification business. In addition, some typical business models of electrification are evaluated, and installation feasibility of the distributed power system with solar power is discussed as case study in Bangladesh. As result, it is suggested that micro-grid with solar power should be deployed aggressively as a sustainable electrification business.

Keyword

Developing country, Electrification, Business evaluation, Distributed power system, Solar power generation

1. はじめに

近代的な経済活動において電力は必要不可欠な生産要素である。電力へのアクセスがない人々は、非効率な経済活動や公衆衛生上の不当なコストを強いられており、これは格差・貧困問題の一要因として捉えられている¹。特にこの問題が深刻である開発途上国では、電化率向上が重要政策のひとつとして掲げられ、ODA、民間資本を利用した電化事業が数多く進められている。

電化の実現手段は、エネルギー技術の進展に伴い近年大きく変化している。従来の電化事業は火力発電を中心とする大規模設備の建設により行われてきたが、近年の太陽光・小型水力発電等の自然エネルギー技術の進歩により、これらを用いた分散型電力供給システムの経済性が事業水準に見合うようになったためである。特に太陽光発電の個別世帯への導入は、系統電力の延長と並び世界的に多くの電化事業で採用されている。

しかし、その実情として、目的とする持続的電化が達成されないケースが多く存在する。IFC (2007) は、全世界に導入された2~3百万の太陽光発電のうち1/4~1/3は稼働しておらず、その原因としては維持・管理における消費者・事業者の経済的破綻を挙げている。例えば、電力システム導入後、消費者がバッテリー交換費用や電力料金の支払いが不可能になる、あるいは電力事業者が消費者の購買力に合わせて低い料金設定をすることによって事業継続が困難になる、等の理由により結果的に電力が使われていないのである。

このような破綻を回避して実効性のある電化事業とするには、計画段階で消費者・事業者双方の経済性を鑑みたビジネスモデル評価が必要である。本稿は、太陽光発電を利用した開発途上国の電化事業において、事業の継続性を踏まえたビジネスモデル評価体系を提案するものである。また、最貧国のひとつに数えられ、分散電源システムによる電化が大きな成果を上げているバングラデシュをケースとして経済性評価を行い、開発途上国における電力供給システムの将来像に対する示唆を得ることを試みる。

2. 先行研究と本研究の目的

開発途上国の電化事業、特に自然エネルギーによる分散型システムの技術的経済性については、近年の実証事業の増加と相まって数多く研究されている。Sinhaら(1991)の系統電力網と自然エネルギー1kWhあたりの発電コストの比較にはじまり、A. Chaurey(2010a)の10か国以上を対象とした太陽光発電等のlevelled unit cost of electricityによる評価等がある。また、Mondalら(2010)は分散型電力システムの最適化ツールHOMERを用いて、バングラデシュでの実証実験を元に経済性を検証している。しかし、これら従前の経済性評価は、事業主体のコストのみに注目した静的環境下における分析であり、電化事業が目的達成まで持続性に展開可能かは分からない。したがって、これらの評価手法では電化技術の導入ありきの無理な計画になる可能性があり、前述のような消費者側での経済破綻、ひいては事業者の経営破綻を引き起こす要因になりかねない。

そこで、本研究では開発途上国における実効性のある電化事業のビジネスモデル評価のため、以下2点を考慮した経済性評価モデルを構築することを目的とした。

- ・ 事業者のみならず消費者までを含む地域経済システムを包括的に捉える。
- ・ 地理的要因と時間的要因を考慮し、事業継続性を動的に捉える。

このモデルにより、バングラデシュをケースとして、太陽光発電を利用した電化事業の代表的ビジネスモデルの経済性・持続性評価を行った。併せて、バングラデシュ各地域で最適ビジネスモデルによる電化を行う場合の、太陽光発電による分散電源システムの導入可能性を試算した。

¹ これらの問題は、IEA(2010)においてEnergy Povertyとよばれている。解決策のひとつとして電化が有力視されており、例えば、灌漑ポンプ電化による農作業効率化や照明利用による労働時間の延長等、所得向上に直接寄与するものから、暖房用の薪採集からの解放による児童の不登校の解消、薪を使用した調理のガス利用への転換による乳児の衛生状態の改善等、間接的に生活水準を上げるものまで、種々の効果が実証されつつある。

3. 電化事業評価モデル

本稿で提案するモデルは、電力供給の継続的運用を目的とし、従来のビジネスモデル評価のような事業主体の経済性のみならず、消費者を含めた地域経済システム全体の経済性評価を行うモデルである。(Fig.1) ビジネスモデルの評価・選択では、事業者・消費者双方のコスト（以降では、それぞれ事業コスト、コミュニティコストと呼び、これらの合計を社会コストと呼ぶ）を最小化するものを選ぶ。その際、展開される製品/サービスの購入是非は、対象地域の消費者の支払能力を鑑みて決定される。また、当該地域の電化率 100%を達成するまでの電化事業の継続性を考慮するため、計算においては個別世帯についての所得とその時系列変化を追う。以下では、コミュニティコストの考え方と選択肢となるビジネスモデルの定式化について述べる。

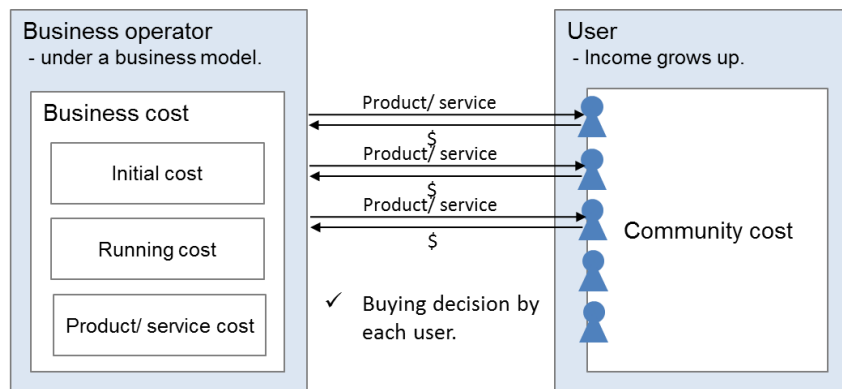


Fig.1. The eco-system composed by business operator and user at an area under electrification in this model

3.1. 電化事業におけるコミュニティコスト

本研究ではコミュニティコスト C_{com} は消費者がある効用（機能）を得るためのコストと定義し、これには製品・サービスの購入、および維持にかかるコストが含まれるものとした。REB (2006) によれば、電化された家庭の 98%が電力をまず照明に用いているため、本研究では電化の効用として照明機能を得ることとした。すなわち、消費者は現行の照明手段と新たな手段（電灯）の将来コストの現在価値を比較し、より安価なほうを選択する。これにより、消費者は現行の経済活動の延長上で電化是非を決定することができ、一方で事業者はそれに基づく価格付けが可能となるため、事業の継続性が保障される。

この購買判断による各世帯の電化是非を通して、電化率 100%を達成するまでの動的過程を見るために、本モデルでは代表的家計を仮定せず個別世帯の経済について計算を行う。非電化状態の消費者は一般的に照明に灯油ランプを用いており、所得の高い者ほど多くの支出をそのコストに充てる。Chaurey (2010b), Mills (2003) によれば、非電化地域での一般的照明利用時間は 4 時間/日であることから、本研究も灯油ランプによる 4 時間分の照明コストの現在価値を購入判断の際の基準とし、GDP 増加による所得水準がそれに達すれば電化されるとした。すなわち、後述の社会コスト算出式(1)~(6)ではこの購入判断に基づき、世帯 i が非電化世帯の場合は灯油ランプによる照明コストが、電化世帯であれば製品・サービス購入年に支払が発生し、それらの合計がコミュニティコスト C_{com} として与えられる。

3.2. 電化事業のビジネスモデル

電化技術としては、集中型/分散型の 2 つのシステムを採用することができる。分散型については、さらに Micro grid (MG) と Stand alone の 2 種に分けられる。MG 型は国の電力系統から独立した小規模システムシステムであり、Stand alone 型は単一消費者（家庭やビル）向けに負荷近傍に電源を配置して送電コストを抑える独立シス

テムである。さらに、これらの電源として火力、水力、太陽光、風力等のエネルギー源を組み合わせることで、多様な電力供給システムが設計される。本評価モデルでは、1km²の特定地域における電化事業の地域経済システム全体を時系列で捉え、その社会コスト最小化を実現するビジネスモデルが最適なシステムとして採用される。これらを踏まえ、本研究で対象とする代表的な4つのビジネスモデルの社会コスト SC の現在価値を計算するための式を以下で述べる。

Model 1 : Solar Home System (SHS)

Stand alone 型の太陽光発電システム。当システムは電力消費の最小単位である各世帯に対して、個別の太陽光発電モジュール（パネルとその他設備）と蓄電池とを導入するものであり、製品組立・販売型のビジネスモデルである。社会コストは以下のように定式化される。なお、SHS と SMG の定式化は Chaurey (2010b) のモデルを元に行っている。

$$SC_{SHS} = C_{init} + \sum_t \left[\left\{ C_{run_t} + N_t \times (C_{pv_t} + C_{batt_t} + C_{cc_t} + C_{bos_t} + C_{app_t} + C_{O\&M_t}) + \sum_i C_{com_t} \right\} \times \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (1)$$

ここで、 C_{init} : 事業者の初期費用、 C_{run} : 事業者のランニングコストであり、事業者が1km²の範囲で、計算期間末期の想定世帯数への販売・メンテナンスをカバーできる事務所を用意する管理コストを表す。 C_{com} : コミュニティコストである。いずれも単位はUSDである。また、 N_t : t 期の販売数 (i.e.電化世帯数)、 r : 割引率であり、添字 t : 計算期、 i : 当該地域の世帯を所得の高い順に並べたときの第 i 番目の世帯番号を表す。また、 C_{pv} : 太陽光発電モジュール、 C_{batt} : バッテリー、 C_{cc} : チャージコントローラー、 C_{bos} : Balance of systems、 C_{app} : 付属の電灯、 $C_{O\&M}$: 設置/メンテナンス等費用のコスト[USD]をそれぞれ表す。

Model 2 : Solar Micro Grid (SMG)

Micro grid 型の太陽光発電システム。これは太陽光発電モジュールと蓄電池を中央に置き、一定範囲の世帯を連系させたシステムを想定している。SHS に比べ、同一電源からの利用者が複数に増えるために需要タイミングが分散され、発電容量に対する利用効率が向上するが、連系のための追加費用がかかる。ビジネスモデルとしては SHS と同様に、製品設備の組立・販売型としており、コミュニティが設備を買い取り、管理運営のみ事業主体が行うものとした。社会コストは次式によって表される。

$$SC_{SMG} = C_{init} + \sum_t \left[\left\{ C_{run_t} + N_t \times (C_{pv_t} + C_{batt_t} + C_{pcu_t} + C_{pdn_t} + C_{app_t} + C_{O\&M_t}) + \sum_i C_{com_t} \right\} \times \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (2)$$

ここで、 C_{pcu} : Power Condition Unit、 C_{pdn} : Power Distribution Unit のコスト[USD]である。中央で発電し、それをネットワーク化することによってスケールメリットがでるため、SHS とは計算方法が異なる。この配電ネットワーク費用に当たる C_{pdn} については、Chaurey (2010b) のデータを元に、下式により与えた。

$$C_{pdn} = 600 \times \left(\frac{PD_0}{HS} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

PD_0 : 計算初年度の当該地域の人口密度[人/km²]、 HS : 当該地域の世帯構成員数[人世帯]である。SMG、NGE においてもこの式を用いている。

Model 3 : Diesel Micro Grid (DMG)

SMG の中央発電設備をディーゼルエンジンに置き換えたシステム。SMG との違いは、ディーゼル燃料の消費・輸送費がかかることと、燃費効率を考慮して発電容量の小型化に限界がある（本研究では導入ロットを1kWとした）ことである。ビジネスモデルとしては SHS、DMG と同様に製品設備の組立・販売型であるが、燃料費

に関してはコミュニティが直接負担するものとした。以下の式により社会コストが表される。

$$SC_{DMG} = C_{init} + \sum_t \left[\left\{ C_{run_t} + N_t \times (C_{dzt_t} + C_{pcu_t} + C_{pdn_t} + C_{app_t} + C_{O\&M_t}) + \sum_i C_{com_t} \right\} \times \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (4)$$

ここで、 C_{dzt} : ディーゼルエンジンのコスト[USD]である。また、ディーゼル燃料費 $C_{dztfuel}$ は下式で表わされ、累積導入数に応じたコストがコミュニティ側に加算される。

$$C_{dztfuel} = (\eta_{mfg} \times h \times 1[\text{kW}] + C_{trns} \times Dfpt) \times P_{dztfuel} \quad (5)$$

ここで、 η_{mfg} : 燃費[l/h/kW], C_{trns} : 燃料輸送費[US\$/km], $Dfpt$: 貿易港からの距離[km], $P_{dztfuel}$: ディーゼル燃料価格[USD/l]である。

Model 4 : National Grid Extension (NGE)

従来の大規模集約型の発電および電力システムの拡張によるシステム。他 Model とのコスト比較のため、前述の照明用途に足る分の電力を提供するものとした。グリッド拡張については、送電網を既存の変電所から当該地域まで延長、配電は上記 Micro grid 同様の構成を以て各世帯へ行うものとした。ビジネスモデルとしては、事業会社が設備を持ち、コミュニティに対する電力販売とそれに対する料金徴収という形を取るものとし、計算初年度に対象地域全員が電化されるものとしている。

$$SC_{NGE} = C_{init} + (C_{est} \times Dfng + C_{pjt} \times N_0 \cdot L \cdot h + C_{pdn_0}) + \sum_t \left[\left\{ C_{run_t} + (C_{O\&M_t} + C_{gasfuel_t}) \times N_t \cdot L \cdot h + \sum_i C_{com_t} \right\} \times \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (6)$$

ここで、 C_{est} : 当該地域への送電延長コスト[USD/km], $Dfng$: 当該地域の電力システムからの距離[km], C_{pjt} : 発電量あたりの発電設備建設等プロジェクトコスト[USD/Wh], $C_{gasfuel}$: 発電量あたりの燃料コスト[USD/Wh], L : 電灯の負荷[W], h : 年間使用時間[hour]である。

4. ビジネスモデル評価の対象地域とデータ

本稿では、前述のモデル評価に当たり、最貧国の一つに数えられるバングラデシュにおける電化事業を想定してケース分析を行う。バングラデシュの電力インフラは 1970 年代冒頭の独立戦争の際に大きなダメージを受けた後、Asian Development Bank や World Bank 等が積極的に資金提供を行ったことで、発電量は年率 10%以上で増設され続けた。しかし、1990 年代に入ると、金融危機の煽りを受けて、需要の増大が続くのに対して十分な資金調達ができず、電力供給が極めて不安定な状態に陥った。2010 年時点で電化率は 41%であり、政府による送配電網の拡張と共に、Grameen Shakti²等の個人事業者が SHS による電化事業に取り組んでいる。本稿では、それらの実データに基づき、前述のビジネスモデルの評価を行う。以下でコミュニティコストと事業コストに関わるデータを示す。

4.1. コミュニティコストに関わるデータ

電化事業による製品・サービスの購入判断基準となる、灯油ランプによる照明コストについて述べる。これには、世帯グループごとの所得割合と灯油の支出データ (Table 1) を用いる。

² Grameen Shakti は、Micro finance の業績で著名な Grameen Bank を擁する NGO Grameen Group の傘下組織であり、SHS や Baio-gas stove により農村部における Energy Poverty 解決の草分け的存在である。(<http://www.gshakti.org/>)

Table 1. Percentage share of income of households and kerosene expenditure per income

Income group (decile)	Share of income (%) ^{*1}		Household income (USD)	Kerosene expenditure per income (%) ^{*2} (quintile)
	National	Rural		
National	100.00	100.00	-	-
Decile-1	2.00	2.25	308	1.5
Decile-2	3.26	3.63	496	
Decile-3	4.10	4.54	621	1.3
Decile-4	5.00	5.42	741	
Decile-5	5.96	6.43	879	1.1
Decile-6	7.17	7.63	1,043	
Decile-7	8.73	9.27	1,268	0.9
Decile-8	11.06	11.49	1,571	
Decile-9	15.07	15.43	2,110	0.6
Decile-10	37.64	33.92	4,638	
Top 5%	26.93	23.03	6,299	-

Source : *1 Bangladesh Bureau of Statistics (2011), *2 World Bank (2010)

Table 1 より、所得上位 5%の値を切片として指数関数で近似し、世帯 i の所得を示す下式 (R^2 値=0.864) を得た。

$$Inc_{i,0} = 6298.7 \times \exp\left(-3.129 \times i / \frac{PD_0}{HS}\right) \quad (7)$$

ここで、 Inc : 世帯所得、 i : 世帯番号 (最大値は当該期・地域の世帯数)、 PD : 人口密度[人/km²]、 HS : 世帯構成員数で 4.8[人/世帯]である。人口密度の変化については UN (2011)、所得上昇を IMF (2011) の GDP 成長予測 (年率 6.855%) に従うとして、式(7)を用いて世帯 i の照明コスト C_{light} は次式により表される。

$$C_{light,i,t} = Inc_{i,0} \times (-0.004 \times \ln(Inc_{i,t}) + 0.041) \quad (8)$$

4.2. 事業コストに関わるデータ

まず、事業者の初期費用 C_{init} とランニングコスト C_{run} について述べる。初期費用には事務所や設備等が含まれ、ここでは前述の Grameen Shakti の Technology Center を想定³して費用を置いている。計算単位である 1km² の範囲で、2030 年の想定人口密度 1,250 人/km² への販売・メンテナンスをカバーする事務所を用意するとして、 C_{init} は 2,000USD/year とした。また、実製品価格と Overhead cost を鑑み⁴、 C_{run} は 500\$/year とした。

つぎに、事業者の変動費用 (製造コスト) に関わるデータについて述べる。SHS と SMG に用いる太陽光発電システムの発電容量は Chaurey (2010b) の推計式に基づいて 60Wp、40Wp とし、DMG 用のディーゼルエンジンは 1kW とした。NGE の電源はコンバインドサイクルのガス発電 (バングラデシュは天然ガスが採掘可能なため、発電の 75% をガス発電で行っている) とした。また、IEA (2010) の予測を用い、PV モジュール価格は年率 7.4% 減、ディーゼル燃料価格は年率 1.1% 増とした。その他、前節のモデルにおいて利用するデータを Table.2 に示す。

³ 1,000 世帯をカバーする Technology center で、Manager 2 人、Technician 5 人、平均収入は 1,000\$/year としている。これらは筆者が 2009 年 9 月に行った現地調査による。

⁴ 実製品価格は Grameen Shakti (http://www.gshakti.org/index.php?option=com_content&view=article&id=115&Itemid=124) を参照。製品コスト構成は筆者と Grameen Shakti との私信による。

Table 2. Data for business cost calculation

Variables	Unit	SHS	SMG	DMG	NGE	
L	Load of lighting	W	28	28	28	28
H	Lighting hours for year	hours/year	1460	1460	1460	1460
C_{pv}	Cost of PV module	USD	134	89	-	-
C_{batt}	Cost of battery	USD	115	86	-	-
C_{cc}	Cost of charge controller	USD	12	12	-	-
C_{bos}	Cost of balance of system	USD	41	-	-	-
C_{app}	Cost of appliance for lighting	USD	28	28	974	-
$C_{O\&M}$	Operation and Maintenance cost	USD/HH	1.2	1.2	45.0	0.0005
C_{pcu}	Cost of power control unit	USD	-	34	-	-
C_{ddl}	Cost of diesel engine (1kW)	USD	-	-	135	-
η_{mlg}	Diesel fuel consumption	l/h/kW	-	-	0.6	-
C_{trns}	Cost of diesel fuel transportation	USD/km	-	-	0.5	-
C_{est}	Cost of power cable extension	USD/km	-	-	-	6000
C_{pit}	Project cost for power plant construction	USD/W	-	-	-	0.593
$C_{gasfuel}$	Power generation cost by gas plant	USD/Wh	-	-	-	0.00147

* Source relating to DMG cost calculation is Mondal (2010).

5. 結果・考察

まず、地理的条件によってビジネスシステムの優位性がどのように変わるか分析する。ここで、各ビジネスモデルケースは3つの地理的条件によりコスト優位性が異なる。最初の条件は、事業を展開する地域の電力系統からの距離 $Dfng$ であり、これは系統連系と分散型の比較優位を決める。2番目の人口密度 PD は、事業のスケールメリットに影響する。最後に、ディーゼル燃料の貿易港（バングラデシュのケースでは、輸出入の約90%をカバーする Chittagong）からの距離 $Dfpt$ は、燃料輸送コストに影響し、自然エネルギーとのコスト優位性に影響する⁵。以下では、これらの条件を変化させ、各事業の感度を分析する。なお、パラメータとなる条件以外は平均的農村部を想定して $Dfng=10$ [km], $PD=1050$ [人/km²], $Dfpt=300$ [km] と置き、初期投資額に制限を設けず、これをベースケースとしている。Fig.2 はこれらのパラメータを変化させたときの各ビジネスモデルのコスト優位性を示したものである。

Fig.2.左上図より人口密度の上昇に伴い SHS, DMG, SMG, NGE と優位モデルが変化していくことが分かる。これは、人口密度が上がることでグリッド形成の効率性が向上するためである。また、DMG については人口密度200付近で途切れているが、これは所得上位の35世帯（導入ロット1kWに対する168人分）のうち数世帯が購入可能水準まで所得が達していないため、導入が行われないことによる。つぎに、右上図により NGE は距離が約14kmより離れると他事業に比べコストが高くなるが見取れ、ここで送電網敷設の分散型に対する優位性が失われることが分かる。最後に左下図より、ベースケースにおいて150kmを境に SMG と DMG の優劣が逆転しているが見取れる。これは DMG の燃料輸送コストが距離に応じて増えるためである。以上より、従来電化事業として主に採用されてきた NGE は、人口密度が低い地域ではグリッド形成の効率化が利かず、分散型システムに対してコスト優位性を失うことが分かる。また、分散型システムの電源として太陽光発電とディーゼル発電を比べると、小規模需要となる人口密度の低い地域や燃料輸送費の高い地域では、導入ロッ

⁵ 他にも、Solar system の発電量に影響を与える日照量が考えられるが、バングラデシュの EHFS は 4.06 - 4.42 hours の範囲で安定しており優位性を左右するほどの影響は与えないため、ここでは割愛した。

トの小型化ができ、かつ燃料利用のない太陽光発電のほうがディーゼル発電に比べてコスト優位性があることが確認された。

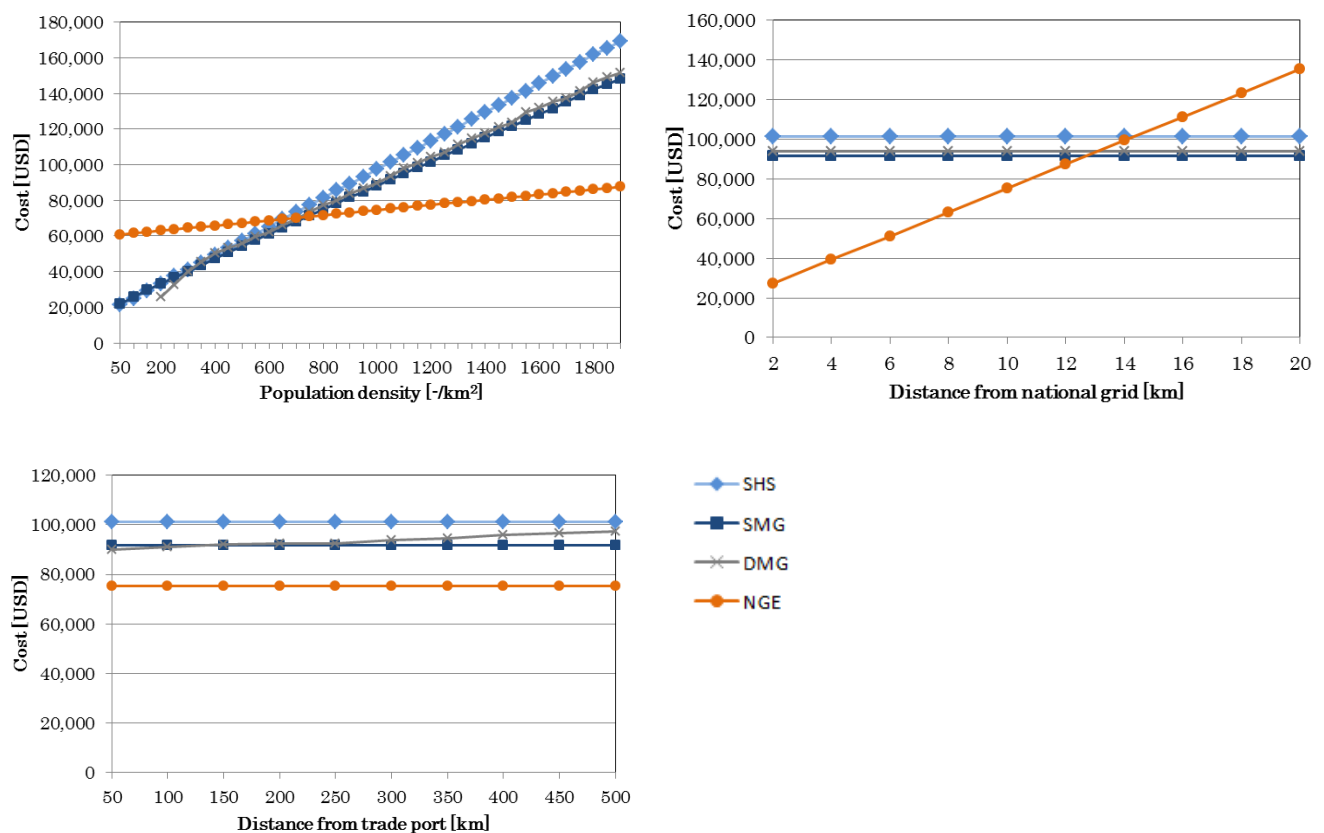


Fig.2. Cost competitiveness change among business models in population density, distance from national grid and trade port

次に、バングラデシュの実際の地理的条件、人口分布、送配電網を踏まえて、地域ごとに選択されるべき電化事業のビジネスモデルについて考察する。最適化に当たっては、まずバングラデシュの地図を 10km 四方に分割して生成したメッシュを各県⁶と対応させ、Bangladesh Bureau of Statistics (2011) を元に人口密度のデータを与えた。つぎに、変電所の位置情報を Power Division, Gov. of Bangladesh, (2006) を元に設定、各セルに最も近い変電所からの距離を与えた。最後に、各セルに貿易港 Chittagong からの距離を与え、これらの設定条件の下で各セルにつき計算を行った。Fig.3 に計算の前提となったバングラデシュの地理的条件と人口分布を記載したマップ、およびそれを踏まえて計算された選択されるべき電化システムの結果を示す。

Fig.3.から、人口密度が高く、既に国の電力系統の変電所が存在する地域は NGE が有利であることが分かる。また、東南の人口密度の低い地域 (100 人/km² 前後) では SHS 導入が有利となっている。続いて、Chittagong から 200km の同心円付近に SMG と DMG の優位性が切り替わる境界があることが分かる。これはディーゼル燃料の輸送費による影響である。この結果では、バングラデシュの国土の 66.4% (人口の 53.2%) は分散型電源による電化が優位となった。また、国土の 54.8% (人口の 43.5%) で太陽光発電による分散型システムの優位性が確認された。したがって、開発初期段階にあるバングラデシュのような国では、太陽光発電による分散型システム、特に SMG での電化を積極的に進めていく必要があると言える。

⁶ バングラデシュの行政区は 7 つの管区 (Division) から成り、その下に 64 の県 (Zila) がある。

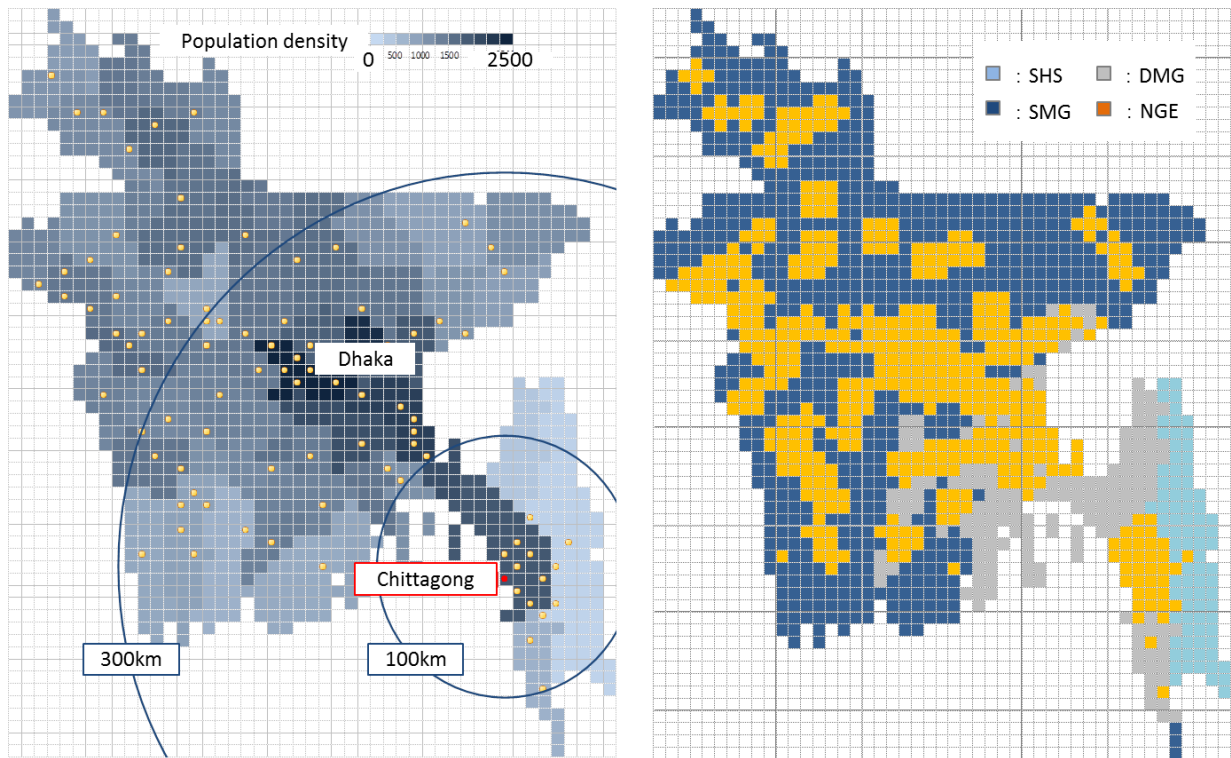


Fig.3. Geographical condition for calculation and adopted business model in Bangladesh

最後に、SMG 導入をベースケース条件下で進める際、持続的な電化事業を進めるのに最低限必要となる資金、および電化進捗について分析を行う。Fig.4.に投資額を 10,000-20,000USD の範囲で変化させたときの電化率と各年の導入率の推移を示す。Fig.4.左図より、100%電化には 16,000USD 必要であり、2019 年に達成されることがわかる。また、それ以上の投資を行っても、消費者の購買力に変化がないので達成年度に変化はない。続いて Fig.4.右図により各期の導入率を見ると、16,000USD 以上の資金投入が行われた場合は、2019 年に大量の導入が行われているのが見て取れるが、これは当該年に消費者所得が製品購入可能な水準まで向上したためである。つまり、2019 年に最低所得者層の購買力が付くまでの、事業者側の事業継続に耐える資金の有無によって 100%電化の達成可否が決まっていることが分かる。このことから、従来の技術コスト計算のみでは、開発効果を踏まえての電化システムの選択はできず、消費者所得を鑑みた事業上の意思決定が必要であると言える。

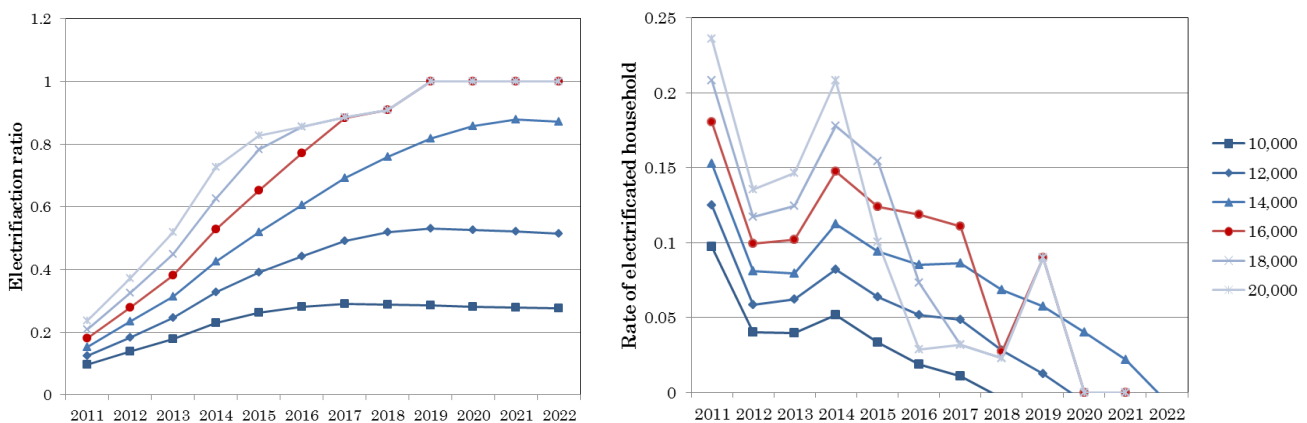


Fig.4. Temporal change in progress of electrification and rate of installed household
(Investment amount: 10,000 - 20,000 USD)

6. 結論

本稿では、開発途上国における電化事業が、その目標達成まで継続的に事業展開するためのビジネスモデル評価手法を提案、バングラデシュでの事業展開を想定してケーススタディを行った。評価モデルとしては、事業者のみならず消費者までを含む地域経済システムを包括的に捉え、かつ地理的要因と時間的要因を考慮して電化事業の継続性を動的に捉えることのできるモデルを開発した。ケーススタディでは、太陽光発電、ディーゼル発電を利用した分散電源システム、および既存の電力系統拡張による事業の経済性・持続性評価を行い、併せてバングラデシュ各地域における電化事業の最適ビジネスモデルを選定した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ これまで主に展開されてきた国の電力系統の拡張による電力システム形成は、系統から遠く、人口密度が低い地域では、分散型システムに対してコスト優位性を失う。
- ・ 小規模需要となる人口密度の低い地域や燃料輸送費の高い地域では、導入ロットの小型化ができ、かつ燃料利用のない太陽光発電のほうがディーゼル発電に比べてコスト優位性がある。
- ・ バングラデシュの国土の 66.4% (人口の 53.2%) は分散型電源による電化が系統延長に対して優位であり、また国土の 54.8% (人口の 43.5%) で太陽光発電による分散型システムの優位性が確認された。
- ・ 最低所得者層の購買力が付くまでの事業継続に足る資金を事業者側が準備できるかにより、100%電化の達成可否が決まることが本モデルにより確認された。

以上のように、本稿で提案した地域経済システム全体を捉える評価手法により、実効性のある 100%電化の目標達成を検討することが可能となった。また、ケーススタディの結果から、バングラデシュでは太陽光発電による分散型システム、特に SMG での電化を積極的に展開すべきことが分かった。

本研究を通じて、人口密度が低いほど有利となる SMG や SHS が、世界で最も人口密度の高い国家であるバングラデシュにおいても有効であることが確認された。これにより、より人口密度の低い世界中の開発途上国における電化事業についても同システムが有効であることが示唆される。今後は、分散型システムによる電化事業を展開するに当たり、消費者の所得成長における不確実性、技術システム・製品ラインの拡張等の評価モデル改良や、電力価格に地域差が発生する場合の市場構成等、より現実に即した研究が期待される。

参考文献

- ・ Bangladesh Bureau of Statistics, (2011), <http://www.bbs.gov.bd/Home.aspx>
- ・ Chaurey,A., Kandpal,C.T., (2010a), “Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview”, *Renewable and Sustainable Energy Review* (14), pp.2266-2278.
- ・ Chaurey,A., Kandpal,C.T., (2010b), “A techno-economic comparison of rural electrification based on solar home systems and PV microgrids”, *Energy Policy* (38), pp.3118-3129.
- ・ IEA, (2010), *World Energy Outlook 2010*, pp.237-271.
- ・ IFC, (2007), “Solar Development Capital: Lessons Learned in Financing Solar Home Systems”, *MONITOR*, No.13.
- ・ IMF, (2011), *World Economic Outlook Database 2011*, <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2011/02/weodata/index.aspx>.
- ・ Mills,E., (2003), *Technical and Economic Performance Analysis of Kerosene Lamps and Alternative Approaches to Illumination in Developing Countries*, Lawrence Berkeley National Laboratory.

⁷ UN (2011) によれば、土地のみを考慮した人口密度の世界平均は 47 人/km² であり、Singapore や Vatican 等の都市国家を除けばバングラデシュの 1,032 人/km² という人口密度は、世界の中で突出して高い。

- Mondal,H.A., Denich,M., (2010), “Hybrid systems for decentralized power generation in Bangladesh,Energy for Sustainable Development.”, *Energy for Sustainable Development*, (14), pp.48-55.
- Power Division, Gov. of Bangladesh, (2006), “Power System Master Plan Update”, Asain Development Bank with Bangladesh Power Development Board and Power Grid Company of Bangladesh Limited
- REB (Rural Electrification Board of Bangladesh), (2006), Final report of Socio-Economic monitoring & Impact Evaluation of the Rural Electrification and Renewable Energy Program in Bangladesh.
- Sinha,S.C., Kandpal,C.T., (1991), “Decentralized vs grid electricity for rural India: the economic factors.”, *Energy Policy* 19(5), pp441-448.
- UN, (2011), World population prospects : The 2010 Revision. <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>
- World Bank, (2010), “Expenditure of Low-Income Households on Energy”, Extractive Industries for Development Series #16

著者紹介



新井 元行 工学修士。同志社大学大学院工学研究科卒。現在東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻博士課程在籍。 BearingPoint (現 PricewaterhouseCoopers) を経て復学。経済シミュレーション, リスクマネジメント手法による開発途上国のエネルギー経済, 開発プロジェクトの研究を行う。



田中 謙司 工学博士。東京大学大学院工学系研究科卒。現在同大学大学院システム創成学専攻助教。マッキンゼー・アンド・カンパニー, 日本産業パートナーズ株式会社を経て 2006 年より現職。二次電池社会システム研究会理事。データマイニング手法, シミュレーション手法を用いた社会システム, 経営システムの設計の研究を行う。



Bagheri Behgol Project Assistant Professor at the presidential endowed chair for Global Solar+ Initiative, Dr Bagheri's research and teaching interests include experiment design and modeling of solar-pumped lasers and thermal analysis. Her current research focus is on solar concentrators. A Sharif University of Technology in Mechanical Engineering graduate (2001) she received her doctorate from Tokyo Institute of Technology (D. Eng., 2009).



阿部 力也 工学博士。東京大学工学部電子工学科卒。現在同大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 アドバンテッジパートナーズ社会戦略投資学寄付講座特任教授。電源開発株式会社を経て, 2008 年 6 月より現職に出向。一般社団法人デジタルグリッドコンソーシアム代表理事。自然エネルギー導入政策評価, デジタルグリッドの研究を行う。



茂木 源人 工学博士。東京大学工学部資源開発工学科卒。日本鉱業株式会社, 東京大学工学部助手, 講師, 助教授を経て, 2007 年から現職。2008 年 4 月から「社会戦略投資学寄付講座」を兼任(講座代表)。2010 年 11 月から「太陽光を機軸とした持続可能グローバルエネルギーシステム総括寄付講座」兼任(共同代表)。著書に「石油ビジネスのしくみ」, 「石油エネルギー資源の行方と日本の選択」など。