

将来の不確実性を考慮した地方自治体における 低炭素型エネルギーシステム計画モデルの開発

立花 潤三¹・浦 和哉²・田中 渉太³・榊原 一紀⁴

¹正会員 富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

E-mail:tatibana@pu-toyama.ac.jp

²非会員 株式会社 環境総合テクノス (〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町1丁目3番5号)

E-mail: ura_kazuya@kanso.co.jp

³非会員 富山県立大学大学院環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

E-mail:t557007@pu-toyama.ac.jp

⁴非会員 富山県立大学 電子・情報工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

E-mail: sakakibara@pu-toyama.ac.jp

本研究では、2段階確率計画法を用いて将来の不確実性を考慮した地方自治体におけるエネルギーシステムの長期計画モデルを開発した。長期計画における最大の懸念材料は、エネルギーシステムを取り巻く様々な社会環境の将来予測が難しいことであるが、確率計画法を用いることで将来的不確実性を考慮した形での最適化問題として定形化することができる。開発したモデルを用いて、2016年から2050年における富山県のエネルギー供給システムの望ましいあり方を検討した。その結果、富山県が保有する再生可能エネルギーの中で利用可能量が多い小水力発電や地熱発電の普及が進み、移入される化石燃料や系統電力消費量が大幅に削減される結果となった。最終期の電源構成は小水力発電が32%、地熱発電が34%、系統電力が29%、風力発電が4%となった。本モデルの開発により、これまでの長期的なエネルギーシステムの検討では考慮できなかった将来の不確実性をモデルに内包した形で最適施策を検討することが可能となった。

Key Words : two-stage stochastic program, energy system, local government, planning model

1. 研究背景と目的

2016年にパリ協定が発効され、各国は中長期的な温室効果ガスの排出抑制の目標値を設定し、その目標達成に向けた取り組みを活発化させている。我が国においては、長期的な目標値として2050年までにCO₂排出量の80%削減などを掲げており、この長期目標に向けた頑健なロードマップの作成が必須となっている。しかし、35年先までの長期計画ともなると、様々な社会状況の変化を予測することが難しく、一つの将来推計に基づく将来設計には無理がある。従って、長期的な計画を検討する上でよく用いられるのはシナリオ分析の手法¹⁾である。いくつかの将来シナリオを設定し、各シナリオごとに戦略を検討することで、将来変動に対しある程度対応力を保持しておくというものである。しかしこの場合、将来シナリオは2~4通りで行うことが多く、検討の幅が限定的となってしまう。それ以上に問題なのは、あるシナリオに沿って作られた戦略を実行途中で、別

のシナリオを進んでいると判断された時点で、別のシナリオでの戦略への移行が必要となり、これまでの戦略と新しい戦略との間にギャップ(無駄)が生じる恐れがある。従って、現行戦略下にあっても他の戦略への移行のリスクを考慮しておく必要がある。

確率計画法は、将来の不確実要素を直接モデルに組み込み、不確実性を含んだままの形で最適解を導出する手法であり、直接解法ではその計算量の膨大さがネックとなっていたが、近年の計算機の処理能力の向上により利用の幅が広がってきている。この手法を用いることで、様々な将来変動に対するリスクを考慮した形で最適解を導出できることから、シナリオ分析的アプローチで生じる無駄が生じる可能性を事前に減少させることが可能となる。

本研究では、地方自治体(富山県)のエネルギー供給システムを対象として、2段階確率計画法を用いた長期的計画モデルの開発を行い、実証的検討を行った。

目的関数	エネルギー供給システムの維持管理、建設、廃棄に係る期間内総費用の最小化
計画変数	各期のエネルギー供給施設の稼働状況を示す状態変数
制約条件	<ul style="list-style-type: none"> 各期のCO₂排出量 エネルギー需要量 財源 再生可能エネルギー利用可能量
OUTPUT	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー供給施設の建設、維持管理、廃棄のロードマップ エネルギー供給・消費の内訳と経年変化 公債発行と償還スケジュール CO₂排出量と排出要因内訳 など

図-1 モデルの概要

2. 研究手法

(1) モデルの概要

モデルの概要を図-1 に示す。計画期間は 2016 年から 2050 年までとし、目的関数は、エネルギー供給システムの建設、維持管理、廃棄に係る期間内総費用の最小化である。計画変数は、各エネルギー供給施設の建設、維持管理、廃棄の状態である。ここで、施設の新規建設は全て地方自治体が自らの財源で主体的に行うこととした。その理由の一つは、2012 年に FIT が施行されて以来、太陽光発電が爆発的に普及した一方で他の小水力や地熱などの再生可能エネルギーの普及は予想を下回っているのが現状であり、その突破口の一つとして自治体の主体的な取り組みが期待されていることが挙げられる⁵⁾。そしてもう一つの理由は、対象地の富山県企業局で、大規模地熱発電や小水力発電の開発など主体的な取り組みに力を入れており、その長期的なロードマップの検討の必要性が高まってきていることである。

目的関数として、期間内のエネルギー供給施設の建設、維持管理、廃棄費用の最小化としているのは、常に合理的なお金の使い方が課せられる自治体の性質を表している。

制約条件は、中期・長期の CO₂ 排出量の削減目標値、各再生可能エネルギーの利用可能量、エネルギー需要量、電源構成に占める変動性再生可能エネルギーの比率そして財源である。

すなわち本モデルは、地方自治体が無駄の無い公共事業を実現しながら CO₂ 削減目標を達成する施設整備のロードマップを出力するものであり、出力として得られる情報は、再生可能エネルギーの導入量、化石燃料の移入量、系統電力の消費量、CO₂ 排出量、収支、地方債の借入・償還などの経年変化である。

(2) 目的関数

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} (IC_i \cdot x'_{it} + MC_i \cdot x_{it} - FI_i \cdot x_{it} + SC_i \cdot x''_{it}) + \sum_{j=1}^J p_1^j q_1^j y_1^{j+} + \sum_{k=1}^K p_2^k q_2^k y_2^{k-} + \sum_{l=1}^L p_3^l q_3^l y_3^{l-} \rightarrow Min \quad (1)$$

ここで、 IC_i : 導入技術 i の建設費 (円/kW), i : 導入技術種, x'_{it} : t 期における新設導入技術 i の設備容量 (kW), MC_i : 技術 i の維持管理費 (円/kW・期), FI_i : 技術 i による収益 (円/kW・期), t : 期 (5 年), x_{it} : t 期に稼働している技術 i の設備容量 (kW/期), SC_i : 技術 i の設備廃棄費 (円/kW), x''_{it} : t 期に廃棄される技術 i の設備容量 (kW), j : 北陸電力の CO₂ 排出係数 (kg-CO₂/kWh) に係るシナリオ, p_1^j : シナリオ j の生起確率, q_1^j : CO₂ 排出量制約の超過分に係るリソース単価 (円/t-CO₂), y_1^{j+} : CO₂ 排出量制約の超過量 (t-CO₂/期), k : 電力需要に係るシナリオ, p_2^k : シナリオ k の生起確率, q_2^k : 電力需要制約の不足分に係るリソース単価 (円/TJ), y_2^{k-} : 電力需要制約の不足量 (TJ/期), l : 熱需要に係るシナリオ, p_3^l : シナリオ l の生起確率, q_3^l : 熱需要制約の不足分に係るリソース単価 (円/TJ), y_3^{l-} : 熱需要制約の不足量 (TJ/期)。

第一項はエネルギー施設の建設、維持管理、廃棄の各費用、第二項から第四項はリソース量の期待値を表す。また、5 年を 1 期とし計画期間は 2050 年まで $T=7$ 期となる。導入技術 i は発電に係るものが 9 種、熱供給に係るものが 4 種、家庭用省エネ技術に係るものが 2 種であるが、木質バイオマスなど市町村ごとに変数を割り当てているものもあるため、発電に関わるものが 52 種、熱供給に関わるものが 53 種、合計 105 種となる。導入技術種一覧を表-1 に示す。

ここで導入技術は「地方公共団体における地球温暖化対策のための計画的な推進のための手引き」⁷⁾ に掲載された技術より選択した。ただし、温度差エネルギー利用、融雪冷熱利用など実用性の低い一部の技術は今回のモデルでは考慮していない。また、各施設の耐用年数は 20 年 (地熱は 15 年) とした。

(3) 計画変数

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + x'_{i,t-1} - x''_{i,t} \quad (2)$$

表-1 導入技術一覧

発電技術 ($i=1, \dots, 52$)	太陽光発電(10kw 以上), 陸上風力発電, 小水力発電 (200kw 以上 1000kw 未満), 中水力発電 (1000kw 以上 5000kw 未満), 地熱発電 (発電単体), 地熱発電 (熱電併給), 木質バイオマス発電 (熱電併給), メタン発酵バイオマス発電 (熱電併給), 廃棄物焼却熱発電 (熱電併給)
熱供給技術 ($i=53, \dots, 75$)	地熱熱供給, 木質バイオマス熱供給, メタン発酵バイオマス熱供給, 廃棄物焼却熱供給
省エネ技術 ($i=76, \dots, 105$)	エネファーム (一般住宅), 地中熱ヒートポンプ (一般住宅)

$x_{i,t}$: 技術 i の施設立地を示す状態変数(kW), $x'_{i,t}$: 技術 i の施設を t 期に建設することを示す状態変数(kW), $x''_{i,t}$: 技術 i の施設を t 期に廃棄することを示す状態変数(kW). なお, 建設中及び廃棄中の期は使用不可とした.

(4) 制約条件

(a) CO₂ 排出量の制約

$$y_{1,t}^{j+} = UE_t^j \cdot ES_t + \sum_{p=1}^P UP^p \cdot PS_t^p - TA_t \quad (3)$$

$$PS_t^p = \sum_{d=1}^D {}^d PS_t^p \quad (4)$$

$$y_{1,t}^{j+} \geq 0 \quad (5)$$

ここで, $y_{1,t}^{j+}$: CO₂ 排出量制約の超過量(t-CO₂/期), UE_t^j : 北陸電力の CO₂ 排出係数(kg-CO₂/kWh), ES_t : 北陸電力からの電力供給量(kWh/期), UP^p : 化石燃料 p の CO₂ 排出係数(kg-CO₂/kWh), PS_t^p : 化石燃料 p の供給量(TJ/期), TA_t : CO₂ 排出量目標値(t-CO₂/期), d : 需要部門.

式(3)は CO₂ 排出量の制約式, 右辺第一項が北陸電力からの電力供給に伴う CO₂ 排出量, 第二項が化石燃料による熱供給に伴う CO₂ 排出量, 第三項が各期の CO₂ 排出量目標値となる. 式(4)における d は産業, 業務, 家庭, 運輸の 4 部門である.

(b) 電力需要の制約

$$y_{2,t}^{k-} = DE_t^k - \sum_{i \in I_e} (x_{i,t} + x'_{i,t}) - ES_t - RS_t \quad (6)$$

$$y_{2,t}^{k-} \geq 0 \quad (7)$$

$y_{2,t}^{k-}$: 電力需要の不足量(TJ/期), DE_t^k : t 期におけるシナリオ k の電力需要(TJ/年), ES_t : 北陸電力からの電力供給量(kWh/期), RS_t : 自治体以外で導入された再生可能エネルギーによる電力供給量(TJ/年).

(c) 熱需要の制約

$$y_{3,t}^{l-} = DH_t^l - \sum_{i \in I_h} (x_{i,t} + x'_{i,t}) - IF_t \quad (8)$$

$$y_{3,t}^{l-} \geq 0 \quad (9)$$

$y_{3,t}^{l-}$: 熱需要制約の不足量(TJ/期), DH_t^l : t 期におけるシナリオ l の熱需要量(TJ/年), I_h : 熱供給技術の集合, IF_t : 県外からの化石燃料移入量(TJ/年).

(d) 各種エネルギーの利用可能量の制約

$$x_{i,t} + x'_{i,t} \leq P_i \quad (10)$$

P_i : 導入技術種 i の域内ポテンシャル.

(e) 不安定な再生可能エネルギー (太陽光, 風力) による発電量の上限制約

$$\sum_{i \in I_e} (x_{i,t} + x'_{i,t}) \leq DE_t \cdot rv \quad (11)$$

rv : 電力需要量に対する不安定な再生可能エネルギー発電の割合上限値.

(f) 財源制約

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} (IC_i \cdot x'_{i,t} + MC_i \cdot x_{i,t} - FI_i \cdot x_{i,t} + SC_i \cdot x''_{i,t}) \leq FB_{t-1} + LB_t - RB_t \quad (12)$$

FB_t : t 期からの繰越金(円/期), LB_t : 地方債発行額(円/期), RB_t : 地方債返済額(円/期).

ただし, t 期の建設費には, t 期に得る売電・買熱利益は使用できず, また t 期における地方債の返済には, t 期に新たに借り入れた地方債は利用できない条件を付与した.

(g) 償還の制約

$$\sum_{t \in T} LB_t = \sum_{t \in T} RB_t \quad (13)$$

式 (13) は最終期(T)において、必ず地方債が完済することを示している。

(5) 確率変数について

筆者らが以前に行ったエネルギーシステム的设计に関する研究において、感度分析の値が高かった制約条件であるエネルギー需要量及び北陸電力のCO₂排出原単位の2つを確率変数とした。

(a) エネルギー需要量

資源エネルギー庁の2030年までの需要見通し⁸⁾を用いて2050年までの需要量を推計した場合をベースシナリオとし、ベースシナリオからそれぞれ+20%, +10%, -10%, -20%と変化させ、5つのシナリオを作成した。各シナリオの生起確率はベースシナリオを中心とした正規分布に従うものとした。

(b) 北陸電力のCO₂排出原単位

ベースシナリオとして、電力事業者連合の目標値⁹⁾を2050年に達成する場合を想定し、ベースシナリオからそれぞれ+20%, +10%, -10%, -20%となる5つのシナリオを作成した。各シナリオの生起確率はベースシナリオを中心とした正規分布に従うものとした。

(6) モデルの条件設定

(a) 建設・維持管理費について

経済産業省発電コスト検証ワーキンググループ報告書¹⁰⁾の推計値を用いた。当該報告は2030年までの推計であることから2050年までは各推計値を延長して値を算出した。

(b) FIT 買取価格について

太陽光に関しては売電価格[円/kW]を従属変数とし、調達価格等算定委員会資料(平成24年~平成28年)¹¹⁾の建設費、維持管理費、IRRを独立変数として重回帰分析を行い将来推計を行った。その他の再生可能エネルギーに関しては、法施行以来、買取価格があまり変化していないことから同様の将来推計ができない。従って(a)で推計した太陽光発電の建設・維持管理費用と買取価格の比を算出し、それを用いて他の買取価格を推計した。推計した買取価格を図-2に示す。

(c) FIT 買取終了時期について

FITでの買い取りは買取価格が系統電力価格以上の場合に限り、系統電力価格を下回った場合はその

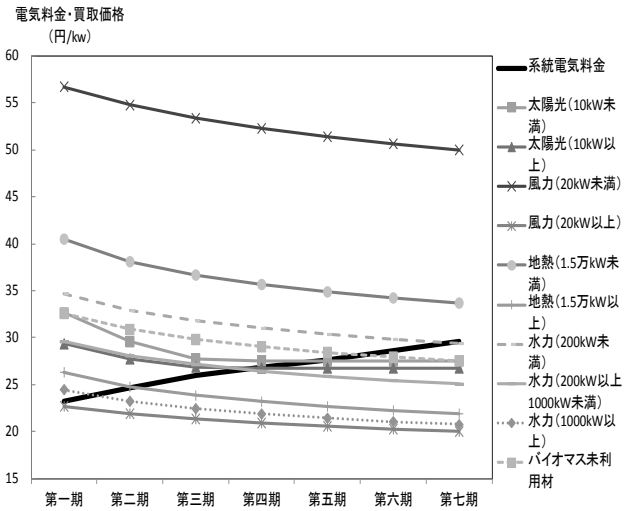


図-2 系統電力価格と買取価格

時期の系統電力価格で買取されるものとした。ここで系統電力の価格は、不確定要素の少ない賦課金の影響のみを価格に反映させて将来推計を行った。賦課金の計算式を式(13)に示す。

$$S = (B - A - O) / De \quad (14)$$

S: 賦課金単価 (円/kWh), B: 買取費用 (円/年)
A: 回避可能費用 (円/年), O: 費用負担調整機関事務費 (円/年), De: 消費電力量 (kWh/年)

(d) 木質バイオマス利用における燃料費

木質バイオマス発電においては建設費、維持管理費とは別に燃料費もコストに計上している。鹿児島県バイオマス基本指針¹²⁾から間伐材の搬出から加工、運輸までの単位当たりのコストを求めた。さらに輸送距離に関しては、各市町村にある林地の中心点から市役所までと仮定し輸送費を算出した。

(e) 熱供給事業の設定

バイオマス発電、廃棄物焼却熱発電、地熱発電においては温水による熱供給(コージェネレーション)も想定している。熱供給は、供給先の立地や施設の構造によって熱配管などの設置コストが変化してしまう。そのため今回のモデルでは仮定の熱供給区域として山口県における導入事例¹³⁾を参考にし一般住宅街を想定した。

(f) 再生可能エネルギーポテンシャル

富山県における再生可能エネルギーの導入可能ポテンシャルは環境省の度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書¹⁴⁾、NEDOの調査結果¹⁵⁾より設定した。ただし、中水力は出力が5000kW未満までのものに限り、太陽光は最も積極的に導入するケー

スの値を用いた。さらに、地熱発電は 150℃以上のポテンシャル値を用いた。富山県の特徴としては安定的な再生可能エネルギーとしては中小水力と地熱発電が多く、木質バイオマスとメタン発酵バイオマスは比較的少ない。

(g) 財源について

富山県の財務資料¹⁶⁾より平成 27 年に富山県で取り組まれた再生可能エネルギーの利用促進や小水力発電の建設、維持管理費への予算である年 50 億円を財源の上限とした。

(h) 地方債の発行について

富山県において地方債の発行における公共事業の充当率は 90%と規定されていることから、富山県が現在環境対策に用いている総額 50 億円を基準に、地方債上限を 500 億円と設定した。ただしこの地方債の返済方式は、半年賦元利均等返済方式で基本的には 4 期分の 20 年で返済を完了するものとした。利率は地方公共団体金融機構¹⁷⁾の平均利率 0.3%とした。

(i) CO₂削減目標値

CO₂ 排出許容量 (削減目標) は 2013 年比で 2050 年には 80%削減するよう線形推移させた。ただし第三期 (2026~2030 年) にはパリ協定で定められた 2013 年比で 26%削減を目標値とした。

3. 研究結果

図-3に本モデルで導出された富山県における2050年までのエネルギー供給計画の内訳を示す。エネルギー供給は、小水力発電で第1期に1,750[TJ/期]供給し、第7期に9,900[TJ/期]供給する結果となった。また、第4期に地熱発電から5,390[TJ/期]供給され、第7期に10,400[TJ/期]となった。一方で、第1期に49,200[TJ/期]であった化石燃料は第7期には21,800[TJ/期]となり、第1期に38,000[TJ/期]であった北陸電力からの供給量は第7期に8,750[TJ/期]まで減少した。最終期の電源構成 (図-4) では小水力発電が32%、地熱発電が34%、系統電力が29%、風力発電が4%となっており、富山県が保有する再生可能エネルギーの特色が色濃く出た結果と言える。

図-5に各期の費用・利益と地方債償還のグラフを示す。借入金は、第1期に総額410億円、第2期に696億円、第3期に1052億円、第4期、第5期、第6期に2500億円となっており、設備投資は第4期から第6期に多い結果となった。初期から中期に借金をして設備投入し、中期から後期にかけてその収益でさらなる設備

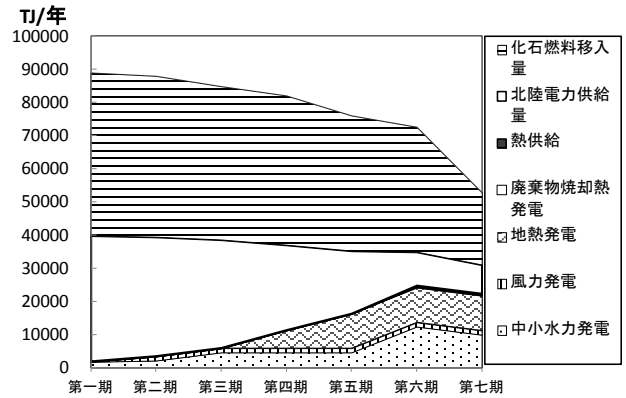


図-3 富山県におけるエネルギー供給計画

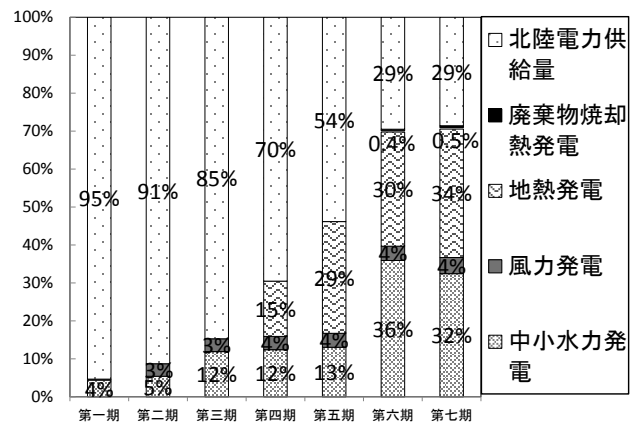


図-4 各期の電源構成

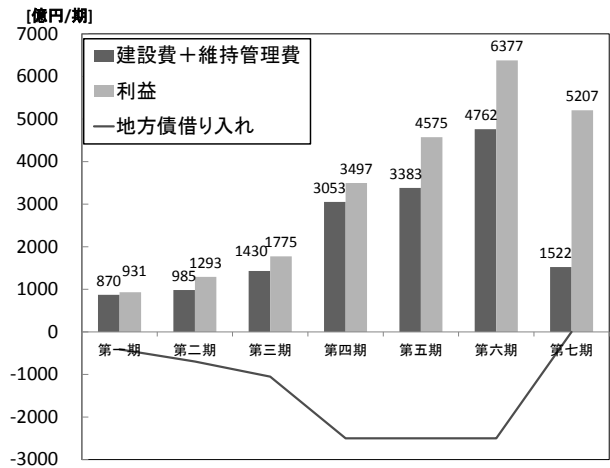


図-5 各種費用・利益及び地方債の償還経緯

投資と借金の返済を行う結果となった。地方債は第4期で最大2500億円でまで膨らむが、その後の利益で、計画期間内に完済する結果となった。

4. まとめ

本研究では、2段階確率計画法を用いた、エネル

ギーシステム計画モデルの開発を行った。

これまで長期的なモデル分析にはシナリオ分析が多く用いられてきた。シナリオ分析は、エネルギーシステムの設計に影響を及ぼす要因（ドライビングフォース）によりいくつかのシナリオを作成し、シナリオごとの最適解を用意しておくものであり、不確定な将来に対して柔軟に対応できるように備えるという意味合いが強い。従って、結局計画主体は、ベースシナリオに従ってエネルギーシステム計画を立てることになり、想定外のシナリオになった場合、ベースシナリオで作った計画から他のシナリオへ移行するリスクが考慮されていない。本研究で開発したモデルではこのリスクを考慮した形でのエネルギーシステムのロードマップを描ける所が特長である。

参考文献

- 1) 佐藤治：我が国の長期エネルギー需給シナリオに関する検討，日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部報告書，2005年。
- 2) 元木悠子・小坂弘行：MARKAL 地域モデルを活用した自治体の長期エネルギーシナリオに関する検討，地域学研究第40巻 第1号，pp. 57-72，2010年。
- 3) 大城賢・増井利彦：わが国を対象とした多地域エネルギー技術選択モデルによる 2050 年までの温室効果ガス削減シナリオ分析，エネルギー・資源，Vol. 35, No. 4, pp. 31-39, 2014年
- 4) 「2050 日本低炭素社会」プロジェクトチーム：2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討，2007。
- 5) 田中充：自治体エネルギー政策の構築に向けて，環境社会学研究 第 8 号，pp. 38-53，2002 年。
- 6) 高橋洋：エネルギー自治の理論的射程，都留文科大学研究紀要 vol. 83, pp. 65-83, 2016 年。
- 7) 環境省：地方公共団体における地球温暖化対策の計画的な推進のための手引き，2014。
- 8) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し，2015。
- 9) 電気事業連合会：電気事業における低炭素社会実行計画の策定について，2015年。
- 10) 経済産業省発電コスト検証ワーキンググループ：長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告，2015年。
- 11) 調達価格等算定委員会：調達価格等算定委員会に関する意見書，2012年-2016年。
- 12) 鹿児島県：鹿児島県木質バイオマス利活用指針，2010年。
- 13) 八千代エンジニアリング株式会社：平成 25 年度バイオマスエネルギービレッジ構築可能性調査事業報告書，2013年
- 14) 環境省：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査，2012年。
- 15) NEDO：バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計，2011年。
- 16) 富山県：平成 27 年当初予算説明書，2016。
- 17) 地方公共団体金融機構：貸付利率 http://www.jfm.go.jp/financing/rate_list.html（最終確認日 2017 年 7 月 31 日）

(2017.4.7 受付)