

## スマートデバイスを用いた環境負荷削減に対する貢献の可視化 Visualization of Contribution for Environmental Load Reduction Using ICT

小出哲彰<sup>†</sup>  
Noriaki Koide

奥原浩之<sup>†</sup>  
Koji Okuhara

### 1. まえがき

近年、地球環境の保全、資源枯渇の回避は人類にとって解決しなければならない極めて重要な課題とされている。人間社会を支える生産活動ではあるが、過去の公害の事例からもわかるとおり、環境への配慮は、企業・行政にとって大きな懸案となっている。持続的経済発展を進めるためには、環境への負荷を把握することが必要不可欠である。

1997年に採択された京都議定書では、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素等の温室効果ガスの排出量を2008年から2012年までの期間において先進国全体で1990年レベルと比べて少なくとも5%削減することを目的として、各国ごとに法的拘束力のある数量化された約束が定められ、我が国については6%の削減が定められた。そうした背景もあり、環境負荷・汚染の見積もりによりデータに基づいた持続的な人間生活の安心と社会の安全を科学的に設計することの重要性は広く認識されている。同時に、国ごとの政策のレベルだけでなく個人や企業からの環境負荷削減に向けた協力も必要であろう。このような協力を促すためにも、個人のレベルでの環境貢献を可視化することは重要である。

また、いかなる規模の環境政策においても、事実証拠に基づいた政策決定 (Evidence Based Policy) が必要とされている [1]。環境効率な社会を実現するには、いくつかの指標を考慮した上で政策が立案されるべきである。ネットワークを介して張り巡らされたセンサーにより、多角的で客観的な実世界の状態を観測することが可能となった。膨大な情報量を取り扱うことが可能となった現在、そうした指標の確立、政策の実施が重要であろう。本稿で取り上げるスマートデバイスも、そうしたセンサーネットワークの一角を形成する。

途上国の経済規模は増加の一途を辿り、今後の環境への影響が懸念されている。経済的な成長のために政策を実施するにあたり、そうした施策を客観的に評価し、施策そのものにフィードバックすることが持続可能な社会を形成するために資する。こうした途上国での環境政策に対する取り組みは、未整備であるインフラ環境から低コストであることが求められる。

提案システムは、廃食用油の回収とそのバイオディーゼル燃料 (以下、BDF) 化による環境負荷削減への個人の貢献を可視化・記録することで、それを促進させるシステムである。こうした可視化・記録されるデータの一貫性を担保することで、付随する環境活動の根拠づけを狙いとす。

本稿では、多様化するデバイスを用いて、十分にインフラが整わない地域でも、低コストでスムーズに環境負荷削減への貢献の可視化が行えるシステムの提案

を行う。その可視化手段により、EBPにおける客観性が担保された政策立案に資する証拠を提示するものである。さらに提案システムによる環境効率な社会の実現について紹介する。

### 2. 廃食用油の回収とそのBDF化に関するLCAにもとづいた個人の削減量可視化

家庭から排出される廃食用油を回収し、BDFを生成、それをバスの運行などに用いるリサイクル活動が、日本だけでなく世界各国で実施されている [2]。廃食用油がBDFとしてディーゼル車で利用されるまでのライフサイクルとして、次に示す過程を経る。

- 家庭における廃食用油の排出、廃食用油の回収、輸送、BDFの生成、配送、ディーゼル車でのBDFの利用

こうした取り組みは、その目的を達成するためにも環境配慮の面において効率的に実施されることが望まれる。一般家系においては、この取り組みに参加・不参加というオプションが存在する。参加した場合とそうでない場合における温室効果ガスの削減量は、後述するライフサイクルアセスメント (以下、LCA) の考えを用いることにより計量的に可視化することが可能である。

LCAとは製品やサービスに対する、環境影響評価の手法の一つである [?]。製品やサービスは、その原料採取から製造、廃棄に至るまでのライフサイクル (原料採取→製造→流通→使用→リサイクル・廃棄) のすべての段階において様々な環境への負荷 (資源やエネルギーの消費、環境汚染物質や廃棄物など) を発生させている。LCAは、これらの環境負荷をライフサイクル全体にわたって、定量的・客観的に評価する手法であり、その活用により環境負荷の低減を図ることが可能である。

廃食用油のリサイクル事業に参加するケースとそうでないケースのLCAによる比較を図1に示す。

図1のような積み上げ方式のLCAにより、各家庭において排出される廃食用油をBDF化リサイクル事業へ提供するケースと個人で廃棄するケースを比較することが可能である。いくつかのパラメータを用いて、廃食用油をBDFとしてリサイクルするケースと各家庭において使い切られるケースでの排出量 (kg-CO<sub>2</sub>e) は次のモデルで推計される。

$$Q_C = \alpha_1 T_C + \alpha_2 s_{pr} c D_c + \alpha_3 r_c + \alpha_{11} s_{br} c D_d + \beta r W r B r C \quad (1)$$

<sup>†</sup>大阪大学 大学院情報科学研究科

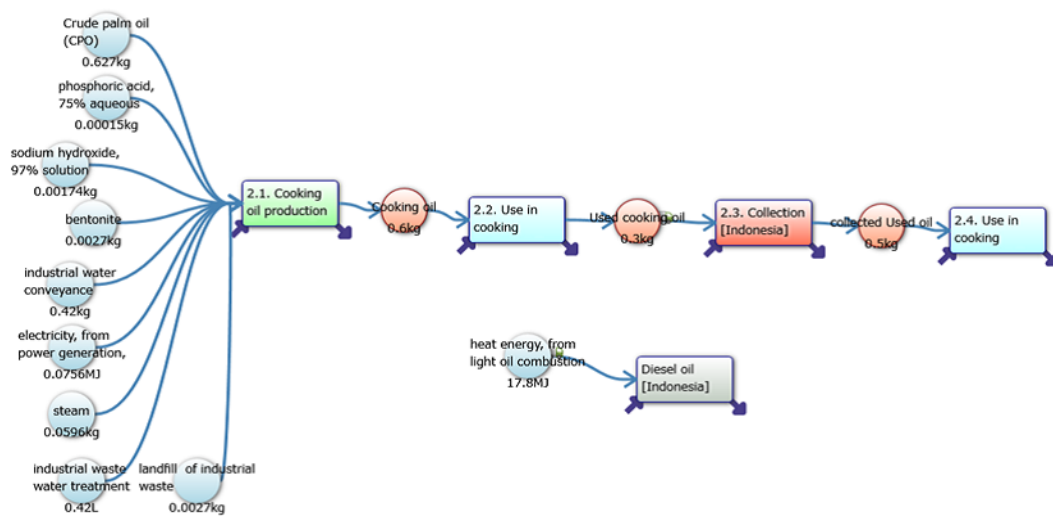


図1: LCAによる排出削減の概要

$$Q_U = \alpha_1(1-r^n)T_C + \alpha_2 s_p(1-r^n)r_c D_c + \alpha_4 \frac{E_b r_c}{E_d} \quad (2)$$

ただし  $T_C$  はリサイクルへ提供された量、 $D_c$  は回収されるまでに輸送された距離、 $D_d$  はBDF化されたあと配送にかかった距離である。また  $r$  は一度の調理で消費される油量の割合、 $r_W$  は消費された上水道に対して汚水が占める割合である。 $\alpha_k, k=1, \dots, 4$  は、上述のライフサイクルにおいて既知のパラメータである。

### 3. スマートデバイスの導入

廃食用油のBDF化に伴う環境負荷削減は、基本的に各個人がどれだけの量をリサイクルに提供したかが考慮される。量的な情報に加えて、輸送の手段であったり廃食用油そのものの質（不純物の混入量や酸化の度合い）が影響する。個人の排出削減はこのような情報の積重ねにより表現されるため、回収1件ごとの細かい情報が必要となる。

こうした情報を収集するために、広く浸透しているスマートフォンを用いる。削減活動に関する詳細情報を実績としてデジタル化する。これにより情報管理、関連事業への応用が容易になる。

また細かな環境負荷推計のために利用できるデータの次元が広がる。

- 経緯度による位置情報
- 端末の識別子
- 廃食用油の特徴に関するアンケート

これらのデータは、参加者の同意の下で収集される。

廃食用油の提供・回収を1件1件を記録するために、各個人の端末が固有に持つIDを受渡する。また

本稿では十分な環境が整わない地域での環境貢献の可視化を想定している。日本のように十分な通信環境

を有する地域の場合、重要な情報は暗号化された通信回線により高速にやりとりを行うことが可能である。個々の端末と通信しておくことで全体の整合性について担保することができる。通信の頻度を必要最小限にとどめるため、また多様化するハードウェアにおいて、どの端末もカメラを有していることから、QRコード（2次元コード）を用いて情報をやり取りする。

QRコードの特徴として以下があげられる。

- 誤り訂正機能が備わっている
- バーコードに比べ大容量のデータをコンパクトに印字できる
- 無料でかつ容易に作成可能である

QRコードは仕様が公開されているオープンなコードであるため、自由に作成することができる。また、英数字で最大4296文字まで扱うことができる。そのため文字数の制限を気にすることなく記述でき、複雑な文字列でも手入力による時間と比べ大幅に短縮できる。

代替案として3G/4G回線を利用したサーバ側でのオンライン管理、また近年一部のスマートフォンに搭載されつつあるNear Field Communication (NFC)や磁気カードによる非接触型の情報伝達なども考えられる。しかしながら搭載されている端末が限定されていることから、NFCや赤外線による実装は難しい。

廃食用油を提供する側と回収する側の異なる2つのアプリケーションを用いる。図2に廃食用油の回収現場にスマートデバイスを導入した場合のオペレーションの概要を示す。次節において、そこでやり取りされる情報とその役割、秘匿方法について述べる。

## 4. 貢献可視化に関する一貫性の確保

### 4.1. 概要

発生するトランザクション1件ごとに固有番号を割り振ることで、回収者の情報も含めて廃食用油に関す

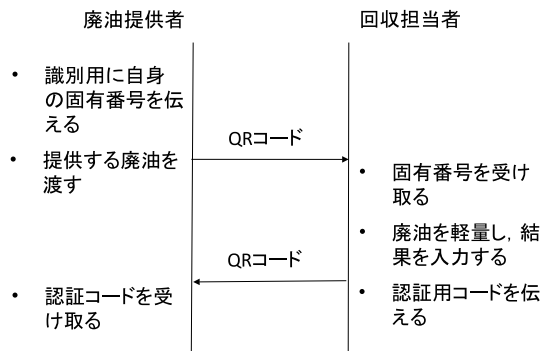


図 2: 現場でのオペレーションと通信の概要

る記録を一意に管理、追跡可能な形で記録する。以下に通信内容を記す。

- 回収 ID, 担当者 ID, 回収量, 回収日時, 提供者 ID から生成される確認用コード

確認用コードは、廃食用油の提供者と認証の受信者を一致させるためのものである。

提供者固有の ID が複製されることで、各個人の廃食用油回収に関する貢献の一貫性が保てなくなる。これを秘匿するために、次の手法を提案する。

#### 4.2. 手法

第三者が認証用のコード (英数列を指す) を生成し得る状況を排除する必要がある。この状況がもたらす結果としては、実績を管理する DB の内容とユーザー側の DB の整合性が取れなくなることが挙げられる。その結果、整合性を維持するために定期的なユーザー側 DB との通信が必要になる。

そのため、認証用のコードについてはあるクラスにおける暗号化が行われていることが妥当と考えた。通信内容の保護手段として、共通鍵暗号方式を用いた以下のプロトコルを提案する。

##### 【送信側】

1. 事前に共有する暗号化のためのフレーズとその番号のテーブルを配布アプリケーションの内部に用意する。
2. 通信開始時において、無作為にフレーズとそれに対応する番号を選択する。
3. 選択されたフレーズを用いて内容を暗号化、暗号文に番号を付加しこれを通信内容とする。

##### 【受信側】

1. 事前に共有する暗号化のためのフレーズとその番号のテーブルを配布アプリケーションの内部に用意する。
2. 付加されている番号を基に、テーブルから複合化のためのフレーズを選択する。
3. 選択されたフレーズを用いて内容を復号化し、UUID をはじめとする情報を取り出す。

この具体的なアルゴリズムを次に示す。

#### 4.3. アルゴリズム

送受信の両側において、平文から QR コード生成時には次のアルゴリズムを用いる。

**Step 1** 送信側, 受信側は鍵テーブル  $K$  を共有する。

**Step 2** 送信側は, 平文  $m$  を  $K$  から無作為に選ばれた鍵  $k \in K$  を用いて任意の暗号化器により暗号文  $c$  を作成する。

**Step 3**  $c$  を配列とし, 新たに  $c_1, c_2, \dots, c_N$  と添え字を割り振る。

**Step 4** 無作為に  $r \in [0, N] \subset Q$  を選ぶ。

**Step 5**  $c[r]$  に  $h(k)$  を挿入し  $c'$  とする。ただし  $h()$  は, 鍵を正整数へ写す写像  $h: K \rightarrow Q^+$  である。

**Step 6**  $c'[s]$  に  $r$  を挿入し  $c^*$  とする。  $s$  は実行時の日付と時刻を用いて生成される鍵である。

**Step 1** に鍵テーブルを用いることで解読に必要な試行回数が集合  $K$  の大きさに比例するため, QR コードの発行ログを監視することで攻撃者の端末の特定が容易になる。また **Step 6** により任意の単位時間ごとに異なる暗号文を生成することで, 同一の QR コードを複数のユーザーで共有することを防ぐ。提案する過程により, 有限回の廃食用油回収において悪意を持ったユーザーから蓄積されるデータの一貫性を守る。これにより, たとえ廃食用油を  $|K|$  に分割して通信を行ったとしても, 単位時刻後には異なる鍵により平文が写像されるため, 新たな攻撃が必要となる。

暗号化器として, AES 暗号を用いた。本稿での取組みにおいては, 必要十分である暗号強度を提供する。事前共有される鍵のテーブルの空間ならびに廃食用油回収による通信試行回数の限定, アプリケーションそのもののアップデートにより, 平文の安全性を実現する。事前共有される鍵のテーブル空間を広くもつこと, また廃食用油回収の特徴としてその通信試行回数の限定されることから, 回収者側のアプリケーションにおける発行ログを監視することで, 攻撃者の特定が容易となる。例えば, 単位期間中に平文の一部を獲得するほどの通信試行を実施するユーザーは攻撃者の候補としてこれに該当する。

以上の過程により, 通信環境が整っていない地域においても, 回収者側・提供者側の双方の DB 上のデータの一貫性を担保する。

## 5. 実施

### 5.1. 貢献の可視化

廃食用油の提供による環境負荷削減への貢献の認証は, 回収者側と提供者側がスマートデバイス上に実装された異なるアプリケーションを用いて行われる。

まず提供者はアプリケーションを起動し, 端末の固有識別子を含んだ QR コードを回収担当者に提示する。回収担当者はこれをアプリケーション内のリーダーで読み込む。回収量を入力する画面が立ち上がるので, 実際に回収した量をここに入力する。入力を終わるとアプリケーションは自動で回収量と認証コードを含んだ QR コードを生成する。担当者はこれを提供者に提示し, 読み取らせる。

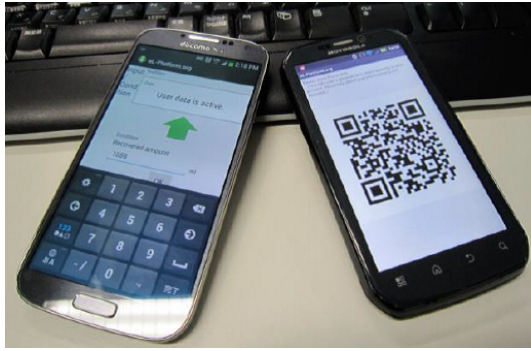


図 3: 廃食用油回収時におけるデータ交換の外観

回収を終えた担当者は、廃食用油を貯蔵する拠点にて、ここで初めて回収に関するデータをサーバーへアップロードする。提供者は、上述の手順により回収された廃食用油の利用状況に関する簡単なアンケートに回答することができる。このデータに基づいて自身の環境貢献を知ることができる。またデータ収集に同意する提供者は、アプリケーションのインターネット通信が可能になった時点で自動的にデータをサーバーへアップロードする。

## 5.2. 政策の実行に対する環境的な制約の具体化

提供者の環境貢献の可視化だけでなく、政策決定者も効率的に環境排出の削減に取り組むことが求められている。

いくつかの地点で回収を行えば良いか、またその位置、頻度について最適化問題を排出量の最小化や削減量の最大化などにより定式化、ユーザー同意の下でスマートデバイスから得られるデータの LCA による環境排出を算出しそれを制約とすることで求解することができる。このようなクラスの問題は施設配置問題や不確実性下における投資問題などとして研究が盛んに行われている。

こうして得られる準最適または最適な解は、提供者の多い地域では削減量について大きく影響するものと考えられる。観測されている状況や、有意なモデルにもとづいて求まる政策を実行することが、事実証拠に基づいた政策決定において必要とされていることであろう。最適化問題の定式化や動的な回収拠点の設定については、本稿の範疇を超えるため、割愛する。

回収の実績データや位置情報などの ID データから、次回の回収地点ならびに日付を自動的に計算・提示するシステムの開発が必要である。

## 6. むすび

本稿では、普及したスマートデバイスを用いることで低いコストで環境負荷の可視化と認証を行うシステムを紹介した。環境負荷削減の認証がカメラ機能を前提とした QR コードにより実装されることで、その他のデバイスにおいては、より簡便な認証が実装されることが期待される。本稿の位置づけは、多様化するデバイスにおいて、下限の環境において情報の一貫性を

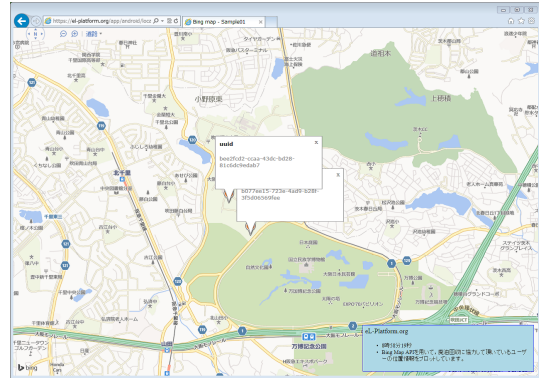


図 4: 回収者は同意にもとづいて提供者の位置情報を Web インターフェースから確認することができる。

担保するための手法を提案するものである。

またセンサとして振舞うスマートデバイスを活用することは多岐に渡る情報の獲得を可能にし、収集される情報により政策の効果をリアルタイムに把握することが可能となった。個人の環境負荷削減が可視化されることにより、環境クレジットなどの施策を実行するための裏付けとなる証拠指標として活用されることが期待される。

## 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Head B, "Evidence-based policy: principles and requirements", in Strengthening Evidence based Policy in the Australian Federation, Vol.1, 2009.
- [2] 宇高史昭, 廃食用油を用いたバイオディーゼルプロジェクトと地方自治体レベルでの気候変動対策の可能性について, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.4, pp.183-186, 2009.
- [3] ISO 14044, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, International Standard Organization(ISO), Geneva, 2006.