

# シュタッケルベルグゲームによる再生プラスチックの利用義務化がメーカーとリサイクラへ与える影響の理論検討

Theoretical Analysis of the Impact of Mandatory Recycled Plastic Usage on Manufacturers and Recyclers through a Stackelberg Game Model

○榎 裕翔 (三菱電機株式会社, Sakaki.Hiroto@ap.MitsubishiElectric.co.jp) 木見田 康治 (東京大学)

## はじめに

### 前提

サーキュラーエコノミーの実現において、資源のリサイクルは不可欠な要素であり、企業の参画を促進するように（法整備も含めて）適切な制度設計が重要[1]

### 事例

- 欧州委員会は2023年、自動車設計・廃車(ELV: End of Live Vehicle)管理における持続可能性要件に関する規則案を公開。新車生産におけるプラスチック使用量の25%以上を再生プラスチックとし、その25%を廃車由来とすることを規定[2]。
- 日本は、家電リサイクル法を通じて、製造業者によるリサイクルを促進する制度が確立。重量が大きく市場価値の高い金属類がリサイクルの優先度として高く、軽量かつ市場価値の低いプラスチック類のリサイクルは相対的に進展が遅い。

### 仮説

欧州のELV規制同様、**日本の家電にも一定割合の再生プラスチックを義務化**。

### 本研究の目的

欧州型の再生プラスチック使用義務化がメーカーとリサイクラの利潤に及ぼす影響を理論的に検討。

Manufactureの利得 $\pi_m$ は以下の通り。

$$\begin{aligned}\pi_m(q_p, \theta, p_r) &= p_p q_p - C_m \\ &= (a - b q_p) q_p - \{c_m + p_r \theta + p_v(1 - \theta)\} q_p \\ &= -b q_p^2 + (a - c_m - p_v) q_p + (p_v - p_r) \theta q_p\end{aligned}$$

Recyclerの利得 $\pi_r$ は以下の通り。

$$\pi_r(q_p, \theta, p_r) = p_r \theta q_p - \mu \theta q_p = (p_r - \mu) \theta q_p$$

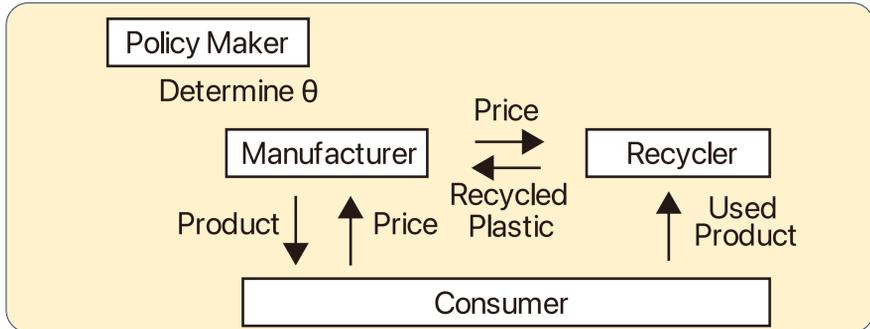
$\mu$ : Recyclerが1単位の再生プラスチックを製造するコスト

以上の条件でシュタッケルベルグゲームを解くと次の結果が得られる。

- 定理1. メーカーが定める再生プラスチックの使用率は $\theta = \theta_{min}$ 。
- 定理2. リサイクラがメーカーへ販売する再生プラスチックの価格 $p_r^*$ は $p_r^* = \frac{a - c_m - p_v + p_v \theta_{min} + \mu \theta_{min}}{2 \theta_{min}}$ 、これに基づいてメーカーが生産および消費者へ販売する製品の数量 $q_p^*$ は $q_p^* = \frac{a - c_m - p_v + (p_v - p_r^*) \theta_{min}}{2b}$ 、価格 $p_p^*$ は $p_p^* = a - b q_p^*$ となる。
- 定理3. 均衡解におけるメーカーの利得 $\pi_m^*$ とリサイクラの利得 $\pi_r^*$ は $\pi_m^* = -b q_p^{*2} + (a - c_m - p_v) q_p^* + (p_v - p_r^*) \theta_{min} q_p^*$ 、 $\pi_r^* = (p_r^* - \mu) \theta_{min} q_p^*$ となる。

## モデル化

### モデルに登場するプレイヤーと役割



- 1) Manufacturer: 家電を製造
- 2) Consumer: 家電メーカーから家電を購入して使用
- 3) Recycler: Consumerから家電を回収して再生プラスチックを製造。Manufacturerへ再生プラスチックを販売。
- 4) Policy Maker: 再生プラスチックの使用割合を決定。

Recyclerをリーダー、Manufacturerをフォロワーとする**シュタッケルベルグゲーム**を使ってプレイヤーの最適戦略を導く

- 1) Policy Makerが再生プラスチックの最低使用率 $\theta_{min} \in (0, 1)$ を決定
- 2) Recyclerは再生プラスチックの価格 $p_r \in \mathbb{R}_+$ を決定
- 3) ManufacturerはRecyclerが設定した $p_r$ を観察してから、製品の生産量 $q_p \in \mathbb{R}_+$ と再生プラスチックの使用率 $\theta \in [\theta_{min}, 1)$ を決定して製品を製造し、Consumerへ販売。

Manufacturerのコスト $C_m(q_p, \theta, p_r) \in \mathbb{R}_+$ は製品を作るコストとRecyclerから購入する再生プラスチックの価格 $p_r$ 、バージンプラスチックの購入価格 $p_v$ の合計。 $C_m$ は次の通り。

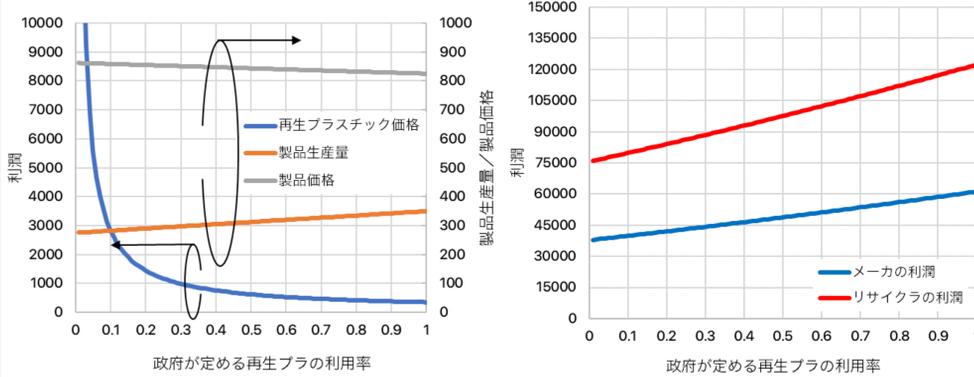
$$\begin{aligned}C_m(q_p, \theta, p_r) &= c_m q_p + p_r \theta q_p + p_v(1 - \theta) q_p \\ &= \{c_m + p_r \theta + p_v(1 - \theta)\} q_p\end{aligned}$$

Manufactureが販売する製品の逆需要関数 $p_p: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ を以下とする。

$$p_p(q_p) = \begin{cases} a - b q_p & (\text{if } 0 \leq q_p \leq \frac{a}{b}) \\ 0 & (\text{if } q_p > \frac{a}{b}) \end{cases}$$

## 数値シミュレーション

Policy Makerが指定する再生プラスチックの最低使用率 $\theta_{min}$ がManufacturerやRecyclerに与える影響を可視化する



Policy Makerが指定する再生プラスチックの最低使用率 $\theta_{min}$ に対するメーカーとリサイクラの利潤

Policy Makerが指定する再生プラスチックの最低使用率 $\theta_{min}$ に対する再生プラスチックの価格と製品生産量と製品価格

政府が定める再生プラスチックの最低使用率 $\theta_{min}$ を増加させると、メーカーおよびリサイクラのいずれの利潤も単調増加になり、再生プラスチックの価格と製品価格は低下し、製品生産量は増加するという検討結果が得られた。

## まとめ

本研究では、欧州型の再生プラスチック使用義務化がメーカーとリサイクラの利潤に及ぼす影響を理論的に検討した。リサイクラをリーダー、メーカーをフォロワーとする完備情報シュタッケルベルグゲームでモデルを構築し、数値シミュレーションを実施した。その結果、政府が定める再生プラスチックの使用割合を増加させても、メーカーおよびリサイクラのいずれの利潤も単調増加になり、再生プラスチックの価格と製品価格は低下し、製品生産量は増加することが明らかになった。

### Reference

- [1] Deutz, P. (2019). Circular Economy. In Elsevier eBooks (pp. 193–201). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102295-5.10630-4>
- [2] End-of-Life vehicles. (2023). Environment. [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en)