

---

# 直接レーザー描画によるペットボトルラベルレス化の環境優位性

## Environmental Superiority of Label-Less PET Bottles with Direct Laser Marking

---

市川 陽一\*      木村 祐一\*\*      田中 涼\*\*\*  
Yoichi ICHIKAWA      Yuichi KIMURA      Ryo TANAKA

---

### 要 旨

---

我々の開発する直接レーザー描画技術は、これまでにない超高速かつ高精細な立体構造物へのレーザー描画技術であり、完全なラベルレスのペットボトル製品の単品販売を可能にする。本稿では、ライフサイクルアセスメント（LCA）により、ペットボトルラベルと直接レーザー描画の温室効果ガス（GHG）排出量を比較することで、直接レーザー描画の環境優位性を評価した。その結果、直接レーザー描画によるペットボトルラベルレス化では、ラベルと比べてGHG排出量が3分1未満まで削減される効果が確認されたので報告する。

### ABSTRACT

---

We are in the process of developing direct laser marking technology, which is an innovative ultra-high-speed and high-definition laser marking method for three-dimensional objects, enabling single-unit sales of completely label-less PET bottles. In this paper, we evaluate the greenhouse gas (GHG) emissions of PET bottle labels and direct laser marking by conducting a life cycle assessment and compare GHG emissions to evaluate the environmental impact of our technology. The results verified that direct laser marking for creating label-less PET bottles produces about one-third less GHG emissions than that of labels.

---

\* 先端技術研究所 樹脂マーキングPT  
Project Team of Marking for Plastic Containers, Advanced Technology R&D Division

\*\* ESG戦略部  
ESG Strategy Division

\*\*\* ESGセンター ESG推進室 RBグループ  
RB Section, ESG Promotion Department, ESG Center

# 1. 緒言

現在、国内販売されるペットボトルの一部製品においてラベルレス化が実現され始めているが、電子商取引（EC）での食品表示りを段ボール箱に記載するなどの、特殊な販売形態のものに限定されている。小売店での単品での店頭販売では、ペットボトルへのインクを用いた直接印刷がリサイクル性の観点から禁止されているため、ラベルによる環境負荷低減は薄肉化や小面積化といった減容化に留まっている。

我々はこれまでにない超高速かつ高精細の直接レーザー描画により、ペットボトル本体にラベルの情報をレーザーで書き込む技術を開発してきた。本技術は完全なラベルレス製品の単体での国内販売を可能にするものである。ペットボトルの直接レーザー描画のイメージ図をFig. 1に示す。このペットボトルのラベルレス化ソリューションを社外へ提案するに当たり、立体構造物へのレーザー描画技術の開発を進めると共に、提供価値となる直接レーザー描画の環境評価を行った。

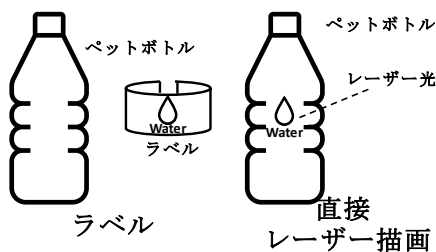


Fig. 1 Schematic image of a labeled PET bottle and a label-less PET bottle with the direct laser marking.

直接レーザー描画の環境評価において比較対象となるペットボトルラベルは、環境配慮型への様々な取り組みを反映し非常に多様化している<sup>2)</sup>。そのため、環境負荷を体系的に分析し評価した結果は、著者らの知る限り報告されていない。

本稿では、直接レーザー描画によるペットボトルラベルレス化の環境優位性を把握するため、ラベルと直接レーザー描画のGHG排出量を、ライフサイクルアセスメント（LCA）により評価し比較を行っ

た。GHG排出は地球温暖化の主要因とされ、GHG排出量は環境負荷の指標の1つとされている<sup>3)</sup>。LCAは製品のライフサイクルを通してのインプットとアウトプットを考慮し、その環境負荷を定量的かつ客観的に把握する手法として広く活用されている<sup>4-8)</sup>。本稿でのペットボトルラベルの環境負荷の体系的な評価においても有効な手段と考えられる。

## 2. ラベルの環境負荷の評価

### 2-1 ラベルの多様性の把握

#### 2-1-1 ラベル面積・重量

ラベルの環境負荷の把握のため、我々は市販のペットボトル飲料97種類を調達し（2022年11月時点）、そのラベルの重量と面積を調査した。以下に示す式(1)は、全調査対象の2021年の国内販売ケース数の総和を算出する式である。また式(2)は各調査対象の国内販売ケース数を算出する式である。

$$B = \sum_{m=1}^{97} B_m \quad (1)$$

$$B_m = B_b \times P_{vm} \times P_{cm} \times V_m \div (V_m + E_{cvm}) \quad (2)$$

$B$ ：解析対象の推定販売ケース数の総和

$B_m$ ：解析対象の推定販売ケース数

$B_b$ ：解析対象のブランドの販売ケース数<sup>9)</sup>

$P_{vm}$ ：解析対象の容量種別での販売比率<sup>9,10)</sup>

$P_{cm}$ ：解析対象の販売チャネル別の販売比率<sup>9,10)</sup>

$E_{cvm}$ ：解析対象と容量種別、販売チャネルが共通で、容器包装が異なるブランド内の製品種数

$V_m$ ：解析対象と容量種別、販売チャネル、容器包装が共通であるブランド内の製品種数

2021年のブランド別の国内売り上げの情報を基に、式(1)と(2)により調査対象とした飲料の売り上げを積み上げると、全ペットボトル飲料の50%以上（ケース単位）となる<sup>9)</sup>。式(2)の容量種別の販売比率とは700 ml以上を大型、それ以外を小型としたと

きの種別ごとの販売量の比率である。また、販売チャネル別の販売比率とは、自動販売機などの業態別の販売量の比率であり、業態を限定しない場合を1とする。さらに、ブランド、容量種別、販売チャネルが同じ製品の中には、内容物は異なるがラベルの印刷内容以外は容器包装が共通である場合や、容量種別が同じであっても、容量にわずかな差があり容器包装が違う場合がある。これらの場合ではそれぞれ販売数が均等であるとして、容器包装が共通の製品数と、容器包装が異なる製品数との比率を考慮した。

入手したラベルは、全てロールラベルとシュリンクラベルに分類された。それぞれのイメージ図をFig. 2に示す。ロールラベルはペットボトルに巻き付けてグルーにより糊付けして装着される。シュリンクラベルは円筒状にしてペットボトルに被せた後に、熱収縮により密着させて装着される。

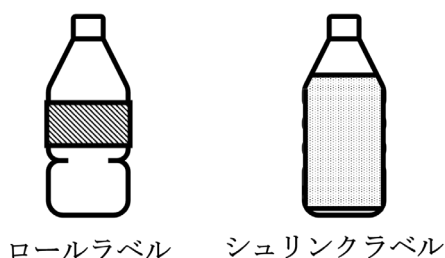


Fig. 2 Schematic image of roll and shrink labels.

評価ではラベルの重量と面積を計測した。ロールラベルに付着するグルーは重量に占める割合が極めて小さいため、グルーを含めてラベル重量を計測した。各ラベルの計測結果から、ラベル種別ごとの平均重量と平均面積を求めた。以下に示す式(3)と式(4)はロールラベルの平均重量と平均面積、式(5)と式(6)はシュリンクラベルの平均重量と平均面積を算出する式である。

$$\bar{W}_{RL} = (B_{R1}N_{R1}W_{R1} + \dots + B_{Rn}N_{Rn}W_{Rn}) \div (B_{RL}N_{RL}) \quad (3)$$

$$\bar{A}_{RL} = (B_{R1}N_{R1}A_{R1} + \dots + B_{Rn}N_{Rn}A_{Rn}) \div (B_{RL}N_{RL}) \quad (4)$$

$\bar{W}_{RL}$  : ロールラベルの平均重量

$\bar{A}_{RL}$  : ロールラベルの平均面積

$B_{R1}, \dots, B_{Rn}$  : 解析対象のロールラベル付きペットボトルの推定販売ケース数

$N_{R1}, \dots, N_{Rn}$  : 解析対象のロールラベル付きペットボトルの1ケース当たりの本数

$W_{R1}, \dots, W_{Rn}$  : 解析対象のロールラベル重量

$A_{R1}, \dots, A_{Rn}$  : 解析対象のロールラベル面積

$B_{RL}$  : ロールラベル付きペットボトルの推定販売ケース数の総和

$N_{RL}$  : ロールラベル付きペットボトルの1ケース当たりの平均本数

$$\bar{W}_{SL} = (B_{S1}N_{S1}W_{S1} + \dots + B_{Sn}N_{Sn}W_{Sn}) \div (B_{SL}N_{SL}) \quad (5)$$

$$\bar{A}_{SL} = (B_{S1}N_{S1}A_{S1} + \dots + B_{Sn}N_{Sn}A_{Sn}) \div (B_{SL}N_{SL}) \quad (6)$$

$\bar{W}_{SL}$  : シュリンクラベルの平均重量

$\bar{A}_{SL}$  : シュリンクラベルの平均面積

$B_{S1}, \dots, B_{Sn}$  : 解析対象のシュリンクラベル付きペットボトルの推定販売ケース数

$N_{S1}, \dots, N_{Sn}$  : 解析対象のシュリンクラベル付きペットボトルの1ケース当たりの本数

$W_{S1}, \dots, W_{Sn}$  : 解析対象のシュリンクラベル重量

$A_{S1}, \dots, A_{Sn}$  : 解析対象のシュリンクラベル面積

$B_{SL}$  : シュリンクラベル付きペットボトルの推定販売ケース数の総和

$N_{SL}$  : シュリンクラベル付きペットボトルの1ケース当たりの平均本数

式(3)から(6)により算出したラベル種別ごとの平均重量と平均面積をTable 1に示す。シュリンクラベルはペットボトルの被覆率が高く、ロールラベルの2.09倍の平均面積を有している。ロールラベルは帯状のラベルを巻き付けるのみでより薄くできるため、重量比は面積比よりも高い3.45倍となっている<sup>11)</sup>。

Table 1 Estimation results of label area and weight.

評価項目	ロールラベル	シュリンクラベル
平均重量	0.38 g	1.31 g
平均面積	$1.29 \times 10^{-4} \text{m}^2$	$2.70 \times 10^{-4} \text{m}^2$

## 2-1-2 プラスチック種別とプラスチックの原材料

ラベルはプラスチックの種別によりその特性を反映して環境負荷が異なる。また、石油、リサイクル材料、バイオ材など、同じプラスチック種別でも原材料の違いにより環境負荷が異なる。ラベルのプラスチック種別として、二軸延伸ポリプロピレン（OPP）、二軸延伸ポリスチレン（OPS）、石油由来ポリエチレンテレフタレート（PET）、再生材料由来ポリエチレンテレフタレート（R-PET）、バイオ材由来のポリ乳酸（PLA）が知られている<sup>2,11,12</sup>。環境評価ではプラスチック種別差と原材料差も比較する。

## 2-1-3 ラベル印刷手段

ラベル印刷ではインクの水性と油性の差や、グラビア印刷やフレキソ印刷の印刷手段の差により環境負荷が異なる<sup>2</sup>。グラビア印刷は凹版印刷方式であり、版上に形成された凹部にインキを充填し、転写することで印刷する<sup>13</sup>。フレキソ印刷は凸版印刷方式であり、インキを版上の凸部へ供給し、転写することで印刷する<sup>14</sup>。同じ水性であってもフレキソ印刷では揮発性有機化合物をより抑えることができるので、環境にやさしいと注目されている<sup>15</sup>。環境評価ではより環境負荷の大きい油性グラビア印刷と、環境負荷の小さい水性フレキソ印刷を比較する。

## 2-2 ラベルのLCA

ラベルの原材料調達から処分・再資源化までのライフサイクルフロー図をFig. 3に示す。2-2-1節以降ではライフサイクルフロー図中の「ラベル製造」、「ペットボトル飲料製造」、「消費・廃棄」の3ステップのそれぞれについてGHG排出量をLCAにより算出する。

GHG排出量は活動量と排出原単位（原単位）の掛け算で算出する。活動量とは事業者の活動の規模に関する量であり、例えば電気の使用量などが該当する。原単位とは活動量当たりのCO<sub>2</sub>排出量であり、例えば電気1 kWh使用当たりのCO<sub>2</sub>排出量である<sup>16</sup>。ペットボトルラベルに関わる原単位は産総研IDEA

Ver.3.2<sup>17</sup>）、サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース（Ver. 3.2）<sup>18</sup>）、電気事業者別排出係数一覧令和5年提出用<sup>19</sup>）の3つのデータベースと先行研究<sup>20,21</sup>）から選択して使用した。

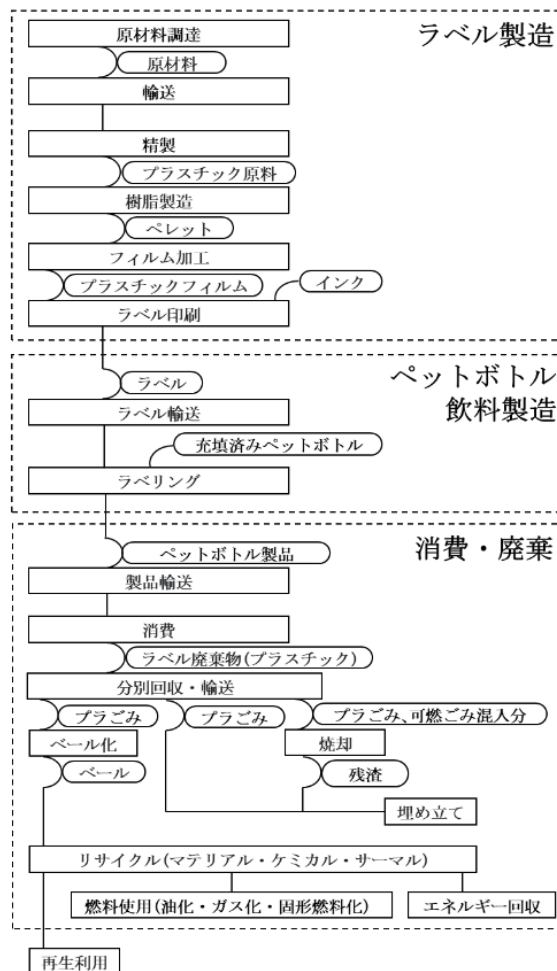


Fig. 3 Life cycle flowchart of labels for PET bottles.

### 2-2-1 ラベル製造

ラベル製造のステップのGHG排出量をTable 2に示す。原材料調達からフィルム加工までの活動量は、ラベル種別ごとの平均重量である。原単位は原材料調達からフィルム加工までのCO<sub>2</sub>排出量であり、OPPが4.50 g-CO<sub>2</sub>/g、OPSが5.33 g-CO<sub>2</sub>/g、PETが6.53 g-CO<sub>2</sub>/g、R-PETが3.25 g-CO<sub>2</sub>/g、PLAが4.11 g-CO<sub>2</sub>/gである<sup>17,20</sup>。ラベル印刷の活動量はラベル種別ごと

の平均面積である。原単位は油性グラビア印刷が0.1069 g-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>、水性フレキシソ印刷が0.03186 g-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>である<sup>21)</sup>。それぞれの印刷幅は、複数のメーカーが取り扱う印刷手段別の軟包装用印刷機を調査し、その平均値とした。Table 2では特に石油由来でないラベルでGHG排出量が少ないことが分かる。また印刷手段自体の環境負荷の差に加え、面積の増加により印刷のGHG排出量は多くなるため、水性フレキシソ印刷のロールラベルのGHG排出量は、油性グラビア印刷のシュリンクラベルの30%以下と少ない。

Table 2 GHG emissions in label manufacturing step.

ラベル条件	GHG排出量 (g-CO <sub>2</sub> /本)
シュリンク/OPP/水性フレキシソ	6.76
シュリンク/OPP/油性グラビア	8.78
シュリンク/OPS/水性フレキシソ	7.84
シュリンク/OPS/油性グラビア	9.87
シュリンク/PLA/水性フレキシソ	6.24
シュリンク/PLA/油性グラビア	8.27
シュリンク/R-PET/水性フレキシソ	5.12
シュリンク/R-PET/油性グラビア	7.14
シュリンク/PET/水性フレキシソ	9.41
シュリンク/PET/油性グラビア	11.44
ロール/OPP/水性フレキシソ	2.12
ロール/OPP/油性グラビア	3.09
ロール/OPS/水性フレキシソ	2.44
ロール/OPS/油性グラビア	3.40
ロール/PLA/水性フレキシソ	1.97
ロール/PLA/油性グラビア	2.94
ロール/R-PET/水性フレキシソ	1.65
ロール/R-PET/油性グラビア	2.61
ロール/PET/水性フレキシソ	2.89
ロール/PET/油性グラビア	3.86

## 2-2-2 ペットボトル飲料製造

ペットボトル飲料製造のステップのGHG排出量の算出結果をTable 3に示す。このステップはラベルのトラック輸送と、ペットボトル製品製造時のラベルの装着（ラベリング）のGHG排出を含む。どちらにも印刷手段やプラスチック種別、原材料差は影響しない。ラベル輸送での活動量はラベル種別ごとの平均重量である。輸送距離を100 km、最大積載量を5 t、積載率を平均積載率、燃料を軽油として、輸送の原単位は0.022 g-CO<sub>2</sub>/gである<sup>18)</sup>。なお、ラベルの紙管など付属する物品の重量は、ラベルに対して割合が十分に小さいと考えられるため無視した。

Table 3 GHG emissions in beverage production step.

ラベル条件	GHG排出量 (g-CO <sub>2</sub> /本)
ロール	0.17
シュリンク	0.22

ラベリングでの活動量は電力消費量であり、ロールラベルとシュリンクラベルの場合のそれぞれについて、生産性に対する消費電力をFig. 4及びFig. 5に示す。複数のメーカーが取り扱う円筒容器用ホットメルト式ロールラベラーを調査し、Fig. 4を作成した。シュリンクラベルのラベリングは、シュリンクラベラーによりラベルをボトルへセットする工程と、シュリンクトンネルを通してラベルを熱収縮させてボトルに密着する工程がある。そのため、Fig. 5は複数のメーカーが取り扱うシュリンクラベラーとシュリンクトンネルを調査し作成した。

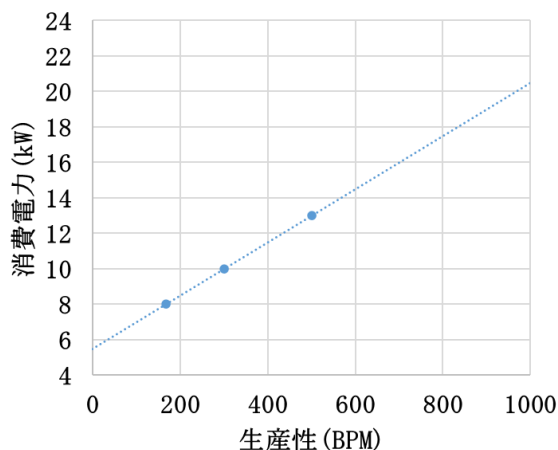


Fig. 4 Power consumption for hot melt roll labeler productivity.

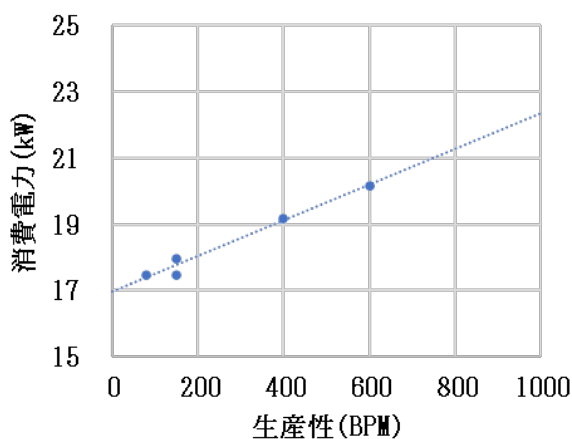


Fig. 5 Power consumption for shrink labeler and shrink tunnel productivity.

飲料生産ラインでは1分当たり数百～千本を超える生産性が要求されるため、生産性の基準値を800 BPMとした。ロールラベラーとシュリンクラベラーの生産性に対する消費電力のフィッティング直線から、800 BPMの場合の値を読み取った。ロールラベラーの消費電力は17.50 kW、シュリンクラベラーの消費電力は21.26 kWである。電力製造の原単位は0.441 g-CO<sub>2</sub>/Whである<sup>19)</sup>。飲料製造の工程で一定の割合で発生すると考えられる製造不良による廃棄は、歩留りを99.90%として算出しても、GHG排出量は十分に少ないため評価に含めなかった。ラベル輸送では平均重量差を反映し、ラベリングでは消

費電力差を反映するため、ステップでのGHG排出量はロールラベルよりもシュリンクラベルが多い。

### 2-2-3 消費・廃棄

消費・廃棄のステップのGHG排出量の算出結果をTable 4に示す。このステップはペットボトル製品のトラック輸送と、製品の消費後の廃棄処分によるGHG排出を含む。どちらにも印刷手段は影響しないため省略した。製品輸送の活動量はラベル種別ごとの平均重量である。輸送距離を100 km, 最大積載量を14.5 t, 積載率を平均積載率, 燃料を軽油として、製品輸送の原単位は0.0109 g-CO<sub>2</sub>/gである<sup>18)</sup>。廃棄処分の活動量はラベル種別ごとの平均重量である。廃棄処分の原単位は、廃棄輸送と手段別に重み付けされた廃棄処分でのGHG排出を含む0.8214 g-CO<sub>2</sub>/gである<sup>18)</sup>。ただし、バイオ材であるPLAでは原材料の二酸化炭素吸収と相殺されるとして、廃棄処分でのGHG排出を0.00 g-CO<sub>2</sub>/gとした<sup>20)</sup>。そのため、PLAの廃棄処分の原単位は0.0472 g-CO<sub>2</sub>/gとなる<sup>18)</sup>。この結果、Table 4においてPLAのGHG排出量は他と比較して著しく少なくなっている。

Table 4 GHG emissions in the consumption and disposal step.

ラベル条件	GHG排出量 (g-CO <sub>2</sub> /本)
シュリンク/PET	1.09
シュリンク/R-PET	1.09
シュリンク/PLA	0.06
シュリンク/OPP	1.09
シュリンク/OPS	1.09
ロール/PET	0.32
ロール/R-PET	0.32
ロール/PLA	0.02
ロール/OPP	0.32
ロール/OPS	0.32

## 2-2-4 ラベル特性ごとのGHG排出量の比較

ラベルと直接レーザー描画のライフサイクルを通してのGHG排出量をFig. 6に示す。

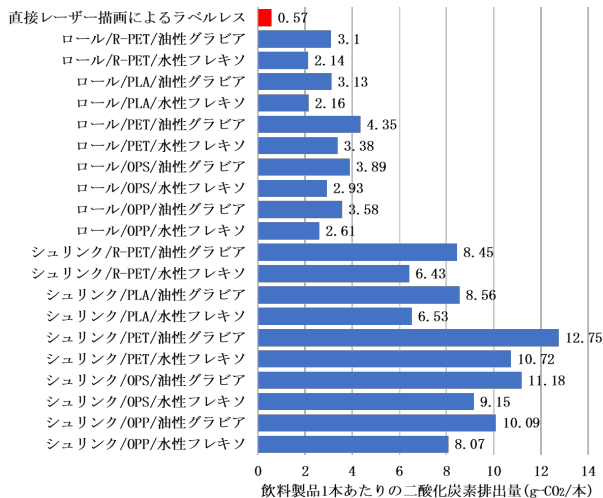


Fig. 6 GHG emission for labeled PET bottles and label-less PET bottles with direct laser marking.

ラベル1枚当たり、ペットボトル製品1本当たりのGHG排出量は2.14～12.75 g-CO<sub>2</sub>/本と、ラベルの特性により大きな差があることが明らかになった。

## 3. 直接レーザー描画の環境負荷の評価

### 3-1 直接レーザー描画の消費電力

直接レーザー描画によるラベルレス化技術のライフサイクルフロー図をFig. 7に示す。Fig. 3のラベルのものと比較して調達や輸送や廃棄がなくなり、ライフサイクルフロー図は簡略化される。

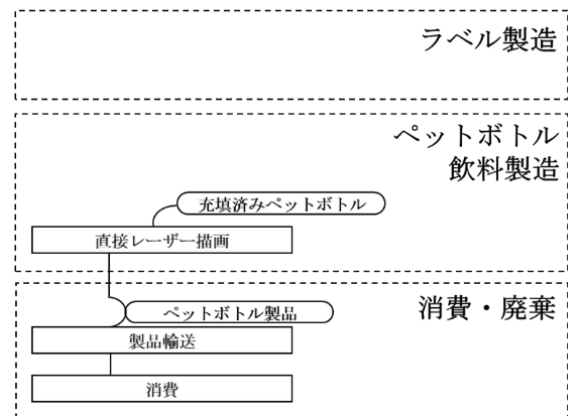


Fig. 7 Life cycle flowchart of direct laser marking label-less PET bottles.

直接レーザー描画ではラベルのようにプラスチックなどの媒体のやり取りがなく、ペットボトルにレーザー描画するためのエネルギー消費がGHGの排出源となる。直接レーザー描画の電力消費量を以下の手順で算出した。3-1-1節以降で各手順の詳細を示す。

- (1) 書き込みに必要なエネルギー量の算出
- (2) レーザーの描画時間の算出
- (3) レーザーの光出力と光源およびシステムの消費電力の算出

#### 3-1-1 直接レーザー描画のエネルギー量

直接レーザー描画では、レーザーアブレーションによりペットボトル上に加工点を形成する<sup>22,23)</sup>。加工点は描画する画像の画素に相当する。加工点では照射されたレーザーの強度分布を反映して、ペットボトル表面が微小に除去されクレーターが形成され

る<sup>22)</sup>。その概要をFig. 8に示す。照射するエネルギーが大きくなるほど、クレーターは深く、広く加工される<sup>24,25)</sup>。ラベルを顕微鏡で観察し、ラベルと同等以上の解像度を400 dot/inch (dpi) とした。解像度400 dpiより、直接レーザー描画で描画する加工点の直径と、加工点同士の中心間隔をそれぞれ63.5  $\mu\text{m}$  とした。解像度400 dpi相当の加工点を形成するのに必要なエネルギーをTable 5に示す。加工点当たりのエネルギー量は24.10  $\mu\text{J}$ である。これは市販のペットボトル容器を対象とした直接レーザー描画の実験結果である。Table 5にある他のパラメータ値は以降の議論で用いる。

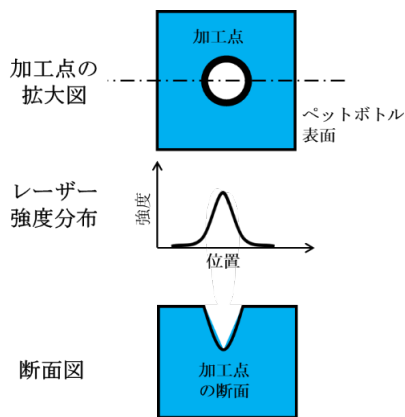


Fig. 8 Top view and cross-section of laser ablation processing point and laser energy profile corresponding to cross-section.

直接レーザー描画により完全ラベルレス製品の単品販売を実現するには、食品表示法<sup>1)</sup>における一般加工食品の表記事項と栄養成分表示をレーザーで書き込めなくてはならない。より小面積である小型ペットボトルのロールラベルを対象に、一般加工食品の表記事項と栄養成分表示の合計の面積を評価した。その平均値である1369.46  $\text{mm}^2$ を直接レーザー描画に必要な描画面積とした。ペットボトル上に描画する範囲を正方形とすると、一辺の長さは37.01  $\text{mm}$ となる。解像度400 dpiであるので、1辺に並ぶ画素数は583画素であり、描画する範囲内の画素数は339,889画素となる。加工点当たりのエネルギー

量は24.10  $\mu\text{J}$ であるので、全339,889画素での照射するエネルギーの総量は8.19 Jとなる。

### 3-1-2 直接レーザー描画の描画時間

一般的なレーザー描画のシステムは、Fig. 9に示すように、レーザー光源と1次元もしくは2次元スキャナ、そしてf- $\theta$ レンズを備える。レーザーの走査では、Fig. 10に示すように加速や減速時などの走査速度が変化する領域では、加工点を一定の間隔で描画することができない。そのため、走査時間内でレーザー描画に有効に使用できる時間の割合（描画時間率）は小さくなる。

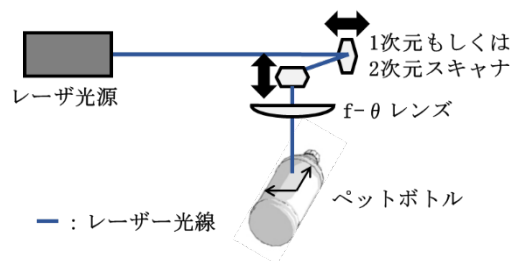


Fig. 9 Basic configuration of a general laser marking system.

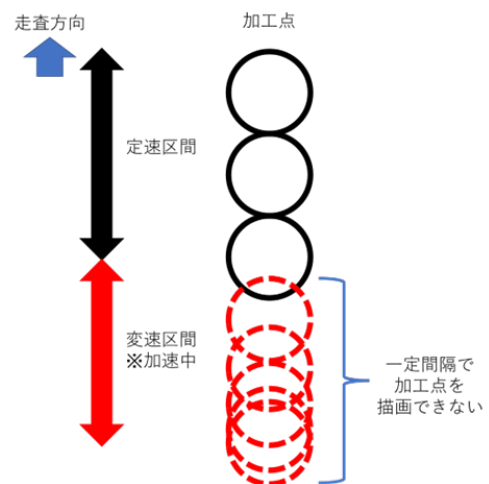


Fig. 10 Effect of non-constant scanning speed area for laser marking.

搬送中のペットボトルへの直接レーザー描画ではFig. 11に示す通り、ペットボトルがシステム正面を通過する間にレーザー描画を行う。描画されるペッ



トボトルの直径を65 mm，ボトル同士の距離がピッチ切り装置により20 mmで揃えられるとすると，85 mmおきにペットボトルが設置される．搬送中に描画できる時間の搬送周期に対する割合は，画像幅とペットボトルが設置される距離の比であり43.54%となる．

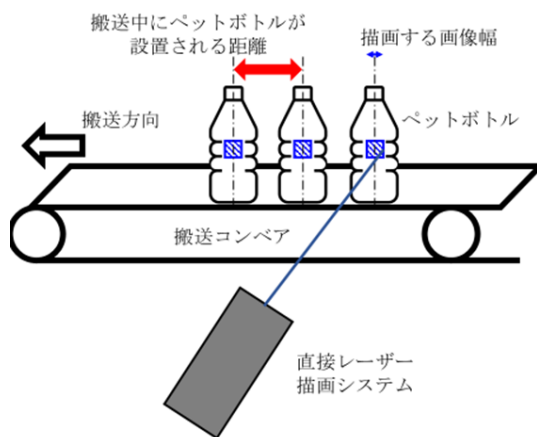


Fig. 11 Direct laser marking on PET bottles transported on a carrier.

Table 5 Parameters for power consumption estimation of direct laser marking system.

項目	数値
解像度400 dpi相当の加工点を形成するのに必要なエネルギー	24.10 $\mu$ J
描画時間率	31.08%
レーザー光源の消費電力の比率	20.69%

生産性800 BPMではペットボトル1本当たりの時間は0.075秒である．この時間はペットボトルが搬送される周期と等しいので，搬送中にレーザー描画できる時間は0.075秒の内の43.54%であり，0.033秒となる．この搬送中にレーザー描画できる0.033秒の内，さらに，Table 5の描画時間率31.08%がレーザー走査中で有効にレーザー描画できる時間となる．有効にレーザー描画できる時間は0.010秒となる．

レーザー描画の時間効率の向上は，今後の高速化に向けた開発の主眼とする領域の1つである．本稿では議論しないが，詳細はソフト・ドリンク技術資料2022年3月号を参照されたい<sup>26)</sup>．

### 3-1-3 直接レーザー描画の光源出力・光源消費電力・システム消費電力

レーザー描画時間0.010秒あたりに8.19 Jを照射するレーザー光源の平均出力は0.82 kWとなる．直接レーザー描画システムが出力するレーザー光をUV光として，光源の波長変換効率を考慮する．基本波長からUV光への波長変換では19%の変換効率が報告されている<sup>27)</sup>．この変換効率から波長変換前のレーザー光源の平均出力を計算すると4.32 kWとなる．基本波長を出力するための電力から光出力への変換効率は，ファイバーレーザーで33%が報告されている<sup>28)</sup>．基本波長の出力4.32 kWに対する消費電力を計算すると13.09 kWとなる．このレーザー光源の消費電力から，Table 5に示すシステム中のレーザー光源の消費電力の比率20.69%により，システム全体の消費電力を計算すると63.27 kWとなる．レーザー光源の消費電力の比率は，レーザー発光時のシステムの評価結果である．

### 3-2 直接レーザー描画のLCA

1時間あたりに生産されるペットボトルは，生産性800 BPMより48,000本である．つまり，ペットボトル1本当たりの電力消費量は0.0013 kWh/本となる．直接レーザー描画の活動量はこの電力消費量0.0013 kWh/本である．電力製造の原単位は0.441 g-CO<sub>2</sub>/Whである<sup>19)</sup>．活動量と原単位の掛け合わせにより，直接レーザー描画のGHG排出量は0.57 g-CO<sub>2</sub>/本と算出される．Fig. 6にラベルと直接レーザー描画のGHG排出量を示す．直接レーザー描画によるGHG排出量は，ラベルのどの条件と比較しても少ない．ラベルで最小の条件と比較してもGHG排出量を3分1以下に削減できる効果がある．

Fig. 6に総括される結果により，直接レーザー描画によるラベルレス化は，顧客の環境貢献を促進する効果的なソリューションであると判断した．既に本環境評価結果に基づくペットボトルのラベルレス化ソリューションの提案を社外へ展開し，複数の企業の製品容器への適用の検討へと発展しており，これらの一部成果は，2022年度グッドデザイン賞，

2022日本パッケージングコンテスト, Asia Star 2022, World Star 2023を受賞するなど, 多方面から高い評価を頂いている<sup>29-32)</sup>. さらに, 本稿にて議論したLCAに基づく環境評価手法は, 新規技術の環境優位性についてライフサイクルの要素をあらかじめ分解し, 注力すべき技術領域を明確化できるなど, 技術開発の効率性を向上するといった副次的な効果が期待できる.

---

## 4. 結言

---

本稿では, 飲料ペットボトルラベルをLCAの手法により体系的に分析し, 条件別にGHG排出量を指標として環境負荷を評価した. また, 直接レーザー描画によるペットボトルのラベルレス化を, その消費エネルギー量を見積もり, GHG排出量を指標として環境負荷を評価した. ラベルレス化の有・無の状況について比較を行うことで環境優位性が明らかとなり, ラベル使用の場合に最小となる条件に対しても, 直接レーザー描画にはGHG排出量を3分1以下に削減できる効果が確認された. このような環境優位性の定量視覚化情報を背景データとすることで直接レーザー描画によるペットボトルラベルレス化技術の価値の訴求までつなげることができ, また今後の新規技術開発におけるモデルケースとしての副次的な価値を示すことができた.

### 参考文献

---

- 1) 東京都福祉保健局健康安全部食品監視課: 大切です!食品表示 食品表示法 食品表示基準手引, [https://www.fukushihoken.metro.tokyo.lg.jp/shokuhin/hyouji/kyouzai/files/tebiki\\_tougouban.pdf](https://www.fukushihoken.metro.tokyo.lg.jp/shokuhin/hyouji/kyouzai/files/tebiki_tougouban.pdf) (参照2023-02-24).
- 2) PETボトルリサイクル推進協議会: PETボトル 3R 改善事例集 II, [https://www.jcpra.or.jp/Portals/0/images/consumer/rule/rule\\_3r\\_01.pdf](https://www.jcpra.or.jp/Portals/0/images/consumer/rule/rule_3r_01.pdf) (参照2023-02-24).
- 3) TCFDコンソーシアム: 気候関連財務情報開示に関するガイダンス 3.0, [https://tcfd-consortium.jp/pdf/news/22100501/TCFD\\_Guidance\\_3.0\\_J.pdf](https://tcfd-consortium.jp/pdf/news/22100501/TCFD_Guidance_3.0_J.pdf) (参照2023-02-24).
- 4) 三島圭一, 高橋斗美子, 大林陽一郎: 製品ライフサイクルを通じた環境負荷評価システムの開発, *Ricoh Technical Report*, No. 39, pp. 168-179 (2014).
- 5) W. Kloepffer: Life cycle sustainability assessment of products, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 13, pp. 89-95 (2008).
- 6) J. B. Guinee et al.: Life cycle assessment: past, present, and future, *Environmental Science Technology*, Vol. 45, pp. 90-96 (2011).
- 7) P. Baldowska-Witos, A. Idzikowski: Assessment of the environmental impact of single-use packaging, *Conference Quality Production Improvement*, Vol. 2, pp. 229-237 (2020).
- 8) A. Ncube, Y. Borodin: Life cycle assessment of polyethylene terephthalate bottle, *7th International Forum on Strategic Technology*, conference paper (2012).
- 9) 有限会社 飲料総研: 飲料ブランドブック2022年版, 有限会社 飲料総研 (2022).
- 10) 一般社団法人全国清涼飲料連合会: 清涼飲料水統計2022, 一般社団法人全国清涼飲料連合会 (2022).
- 11) 一般社団法人全国清涼飲料連合会: 環境配慮設計への取り組み, <http://www.jsda.or.jp/environment/search/pages.php?cat=2&id=1> (参照2023-02-24).
- 12) PETボトルリサイクル推進協議会: PET樹脂の特徴, <https://www.petbottle-rec.gr.jp/more/characteristic.html> (参照2023-02-24).
- 13) 長島正幸, 花園兼一: 最新印刷講座 (第III講) グラビア印刷技術, 色材協会誌, 85巻, 1号, pp. 27-31 (2012).

- 14) 佐々木英彦: 最新印刷講座 (第VI講) 最新フレキシソ印刷技術, 色材協会誌, 85巻, 4号, pp. 164-171 (2012).
- 15) 一般社団法人日本フレキシソ技術協会: 水性フレキシソ印刷の特長, <https://wfpac.jp/features/> (参照2023-02-24).
- 16) 環境省: サプライチェーン排出量算定の考え方, [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/files/tools/supply\\_chain\\_201711\\_all.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/tools/supply_chain_201711_all.pdf) (参照2023-02-24).
- 17) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学部門 IDEAラボ: IDEA Ver.3.2 (2022).
- 18) 環境省: サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース (Ver. 3.2), [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/estimate\\_tool.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_tool.html) (参照2023-02-24).
- 19) 環境省: 電気事業者別排出係数一覧令和5年提出用, <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc> (参照2023-02-24).
- 20) 環境省: 脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業委託業務報告書令和3年度非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業 (王子ホールディングス株式会社), <https://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/itaku.html> (参照2023-02-24).
- 21) 一般社団法人日本フレキシソ技術協会: 温室効果ガス削減, <https://wfpac.jp/page-259/> (参照2023-02-24).
- 22) 藤田雅之, 橋田昌樹: 3.高出力レーザープラズマ研究の新しい展開 3.4 レーザープラズマ工学 (環境・宇宙・産業) 応用 フェムト秒レーザー加工, *Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol. 81, Supplement, pp. 195-201 (2005).
- 23) B. Wu1 et al.: Effects of picosecond laser repetition rate on ablation of Cr12MoV cold work mold steel, *Applied Surface Science*, Vol. 409, pp. 403-412 (2017).
- 24) F. Motomura: Micro drilling simulation of ultra-short pulsed laser ablation of glass, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 418-424 (2015).
- 25) A. Sikora, D. Grojo, M. Sentis: Wavelength scaling of silicon laser ablation in picosecond regime, *Journal of Applied Physics*, Vol. 122, 045702 (2017).
- 26) 林善紀ほか: ソフト・ドリンク技術資料, No. 198 (2022年・第3号), pp. 229-240 (2023).
- 27) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構IoT推進部: 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発, <https://www.nedo.go.jp/content/100940272.pdf> (参照2023-02-24).
- 28) 迫宏: エネルギー変換効率から見たレーザ技術動向, *Sheetmetal ましん&そふと*, 2015年4月号, pp. 12-15 (2015).
- 29) 公益財団法人日本デザイン振興会: 2022年度グッドデザイン賞, <https://www.g-mark.org/award/describe/54301> (参照2023-02-24).
- 30) 公益財団法人日本包装技術協会: 2022日本パッケージングコンテスト, <https://www.jpi.or.jp/saiji/jpc/2022/list.html> (参照2023-02-24).
- 31) The Asian Packaging Federation: AsiaStar 2022 Eco Package, <https://www.asianpackaging.org/awards-winner/> (参照2023-02-24).
- 32) World Packaging Organization: WorldStar 2023, [https://www.worldstar.org/winners\\_detail/3126/2023/](https://www.worldstar.org/winners_detail/3126/2023/) (参照2023-02-24).