

# 青果物輸送における緩衝包装が環境負荷削減に及ぼす影響

輸送振動による損傷を考慮したイチゴのLCA

誌名	農業食料工学会誌 = Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers
ISSN	2188224X
著者名	佐々木, 勇麻 折笠, 貴寛 中村, 宣貴 林, 清忠 八坂, 慶仁 牧野, 直樹 正嶋, 宏一 小出, 章二 椎名, 武夫
発行元	農業食料工学会
巻/号	82巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 65-76
発行年月	2020年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 青果物輸送における緩衝包装が環境負荷削減に及ぼす影響

— 輸送振動による損傷を考慮したイチゴの LCA —

佐々木勇麻\*<sup>1</sup>・折笠貴寛\*<sup>1\*2†</sup>・中村宣貴\*<sup>3</sup>・林 清忠\*<sup>4</sup>・八坂慶仁\*<sup>5</sup>・  
牧野直樹\*<sup>5</sup>・正嶋宏一\*<sup>5</sup>・小出章二\*<sup>1</sup>・椎名武夫\*<sup>6</sup>

## 要 旨

イチゴのトラック輸送時における緩衝包装の保護効果について環境面から評価を行うため、輸送時の損傷を考慮した LCA を行った。併せて、ホットスポット分析により負荷の大きいプロセスの特定を行った。包装条件および輸送距離条件ごとに輸送振動試験を行い、得られたイチゴの損傷率から緩衝包装の有無による環境負荷の比較を行った。ライフサイクルにおいて、「イチゴの生産（施設栽培）・出荷準備」段階における環境負荷が最も大きな寄与度（81.2~99.1%）を示すことが明らかとなった。緩衝包装が持つ保護効果により、損傷分を補うために生じる追加のイチゴ栽培およびそれに伴う環境負荷が抑制され、緩衝包装なしの条件と比較して環境負荷が低くなった。

[キーワード] 緩衝包装, 損傷率, ライフサイクルアセスメント (LCA), イチゴ, 輸送, ホットスポット分析

Influence of Plastic Package on Reduction of Environmental Burden  
during Distribution of Fruit and Vegetables

— Life Cycle Assessment (LCA) of Strawberry Considering Damage by Transport Vibration —

Yuma SASAKI\*<sup>1</sup>, Takahiro ORIKASA\*<sup>1\*2†</sup>, Nobutaka NAKAMURA\*<sup>3</sup>, Kiyotada HAYASHI\*<sup>4</sup>,  
Yoshihito YASAKA\*<sup>5</sup>, Naoki MAKINO\*<sup>5</sup>, Koichi SHOBATAKE\*<sup>5</sup>,  
Shoji KOIDE\*<sup>1</sup>, Takeo SHIINA\*<sup>6</sup>

## Abstract

We assessed the environmental burden of strawberries using life cycle assessment (LCA) with the damage to these products due to vibrations during transport. The vibration test for the transport process was performed for several transportation distances. This test allows the determination of the ratios of damage area as an indicator for injury to strawberries during transport. The environmental burden of the packaging scenario was compared with that of the non-packaging scenario. The cultivation process was a large contributor (81.2~99.1%) to the environmental burden (and thus, a major portion of the life cycle). The environmental burden of the packaging scenario was lower than that of the non-packaging scenario, indicating that package can reduce food loss during transport.

- \*1 会員, 岩手大学 大学院総合科学研究科 地域創生専攻 (〒020-8550 岩手県盛岡市上田三丁目 18 番 8 号), Division of Regional Development and Creativity, Graduate School of Arts and Sciences, Iwate University, 3-18-8, Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan
- \*2 会員, 岩手大学 次世代アグリイノベーション研究センター (〒020-8550 岩手県盛岡市上田三丁目 18 番 8 号), Agri-Innovation Center, Iwate University, 3-18-8, Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan
- \*3 (国研)農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門 (〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12), Food Research Institute, NARO, 2-1-12, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan
- \*4 (国研)農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター (〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3), Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, 3-1-3, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan
- \*5 TCO2 株式会社 (〒102-0082 東京都千代田区一番町 23-2 番町ロイヤルコート 602), TCO2 Co., Ltd., 602 Bancho Royal Court, 23-2, Ichiban-cho, Chiyoda, Tokyo 102-0082, Japan
- \*6 会員, 千葉大学 大学院園芸学研究科 (〒271-8510 千葉県松戸市松戸 648), Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648, Matsudo, Chiba 271-8510, Japan
- † Corresponding author : orikasa@iwate-u.ac.jp

[Keywords] cushioning packaging, ratio of damage area, life cycle assessment (LCA), strawberry, transport, hot spot analysis

## I 緒 言

食料安全保障のあらゆる側面は、食料の入手可能性、利用、価格の安定などにおいて、潜在的に気候変動の影響を受けていることが報告されており (IPCC, 2014), それに伴い食品ロスに対する関心も高まってきている。FAO の報告によると、世界全体で人の消費向けに生産された食料のおおよそ 3 分の 1, 量にして年間約 13 億トンが廃棄されており、捨てられた食料の生産に伴う温室効果ガス (Greenhouse gas, GHG) の発生について、本来、廃棄されなければ発生することの無かった無駄な排出であると指摘している (FAO, 2011)。フードサプライチェーンにおいて、食品ロス・廃棄が発生する主要な段階は、世界の各地域によって傾向が異なるが、果実および野菜類における輸送段階での発生割合は、全地域共通で 10% 程度の割合を占めている (FAO, 2011)。このことから、輸送段階における食品ロス・廃棄の削減は世界の共通課題であると考えられる。

青果物は、損傷が発生してしまうと商品価値の低下や、損傷が引き金となって発生する腐敗等により商品価値を失う。そのため青果物、特に果皮の柔らかいものにおいては、輸送時の振動や衝撃による損傷からの保護を目的に包装を行うべきとされている (Ishikawa et al., 2009)。果皮が軟弱な青果物の 1 つとしてイチゴが挙げられており (多々良ら, 1999; 中村ら, 2007), これまでに、これら青果物の輸送時における衝撃解析や損傷発生予測、輸送方法の検討などに関する研究が行われてきた (高野ら, 2006; 北澤ら, 2010)。また、農林水産業の輸出力強化戦略 (首相官邸, 2016) では、イチゴが重要品目に位置付けられており、輸送の最適化に関する研究の必要性は高いものと考えられる。

包装による内容物の保護機能は、腐敗防止、酸化防止、水分の保持・遮断など多岐に渡る (日本包装技術協会, 1996)。その保護機能の一つに輸送段階における青果物保護が挙げられ、損傷防止の観点から様々な包装形態の検討がなされている (中村ら, 2008; 馬場ら, 2012)。しかしながら、損傷防止や品質劣化の抑制効果のみを指標として包装資材を評価することは、青果物の過剰包装を招く可能性があり、包装資材の製造・廃棄に伴う環境負荷の増加が懸念される。また逆に、環境への配慮を目的とした包装資材の削減も過度に行われてしまうと、包装資材が持つ青果物保護の役割が十分に果たされず、その結果、損耗分を補うための追加的な青果物の生産が行われ、かえって環境負荷が増大する可能性も考えられる。最適な包装条件を検討するためには、包装資材の持つ品質維持機能と包装資材の製造・廃棄に伴う環境負荷の両者を考慮する必要がある (Williams et al., 2008; 経済産業省, 2016), それらを踏まえた総合的な判断が求められる。

環境影響評価手法の 1 つであるライフサイクルアセスメント (LCA) 手法は、製品に使用される資源の採掘から、材料の輸送、加工、生産、流通、使用、リサイクル・廃棄に至るまでの全ての工程を対象とした評価手法である (伊坪, 2009)。そのため、特定の工程における環境負荷にのみ注目するのではなく、ライフサイクル全体を俯瞰的に分析することで、CO<sub>2</sub> 削減のための効果的な戦略を練るための判断材料として利用価値が高いとされている (伊坪, 2009)。また、GHG 以外にも酸性化やオゾン層の破壊への影響など複数の影響領域の評価が可能であり、それにより、ある影響領域の負荷削減が他の影響領域の負荷を増加させるといったトレードオフを考慮することが可能となる。国内におけるイチゴを対象とした環境影響評価の事例は存在するものの (吉川ら, 2007), その評価は GHG および酸性化物質 (Acidifying substance, AS) のみを対象としたものに留まっており、その他の影響領域を考慮した包括的な影響評価を行った例はない。国外においては、イチゴに関する事例は多く存在するものの (Girgenti et al., 2014; Tabatabaie and Murthy, 2016), 輸送時の損傷を考慮し緩衝包装の有無がライフサイクルを通じた環境負荷に及ぼす影響について、定量的な考察を行った報告は極めて少ない。そこで本研究では、イチゴのライフサイクルを事例として、包装資材の製造・廃棄および損傷防止機能が環境負荷に及ぼす影響について LCA 手法を用いて評価を行った。併せて、ホットスポット分析により重要な環境負荷排出源を特定し、環境負荷削減の観点からプロセス改善の可能性について検討したので報告する。

## II 材料および実験方法

### 1. 評価対象およびシステム境界

評価対象は、国内で流通しているイチゴ (*Fragaria × ananassa* Duchesne ex Rozier, 品種: とちおとめ) とした。また、後述する輸送振動試験には、JA 北つくばから入手したイチゴを供試した。

本研究におけるシステム境界を図 1 に示す。イチゴの生産からそれらの消費、廃棄までの全 10 工程とした。また、輸送による損傷の発生について、「輸送 (選果場→卸売)」段階でのみ発生すると仮定した。以下、本研究において、単に「輸送距離」と記載する場合には、「輸送 (選果場→卸売)」段階における輸送距離を指す。

### 2. 機能単位

本研究における機能単位は、小売店における損傷していないイチゴ 1 kg とした。よって生産段階では、輸送時における損傷を考慮し、予め損傷分を上乗せした量を生産するものとした。例えば、輸送時における損傷率が 20% であれば予め 1.25 kg 生産するものとした。

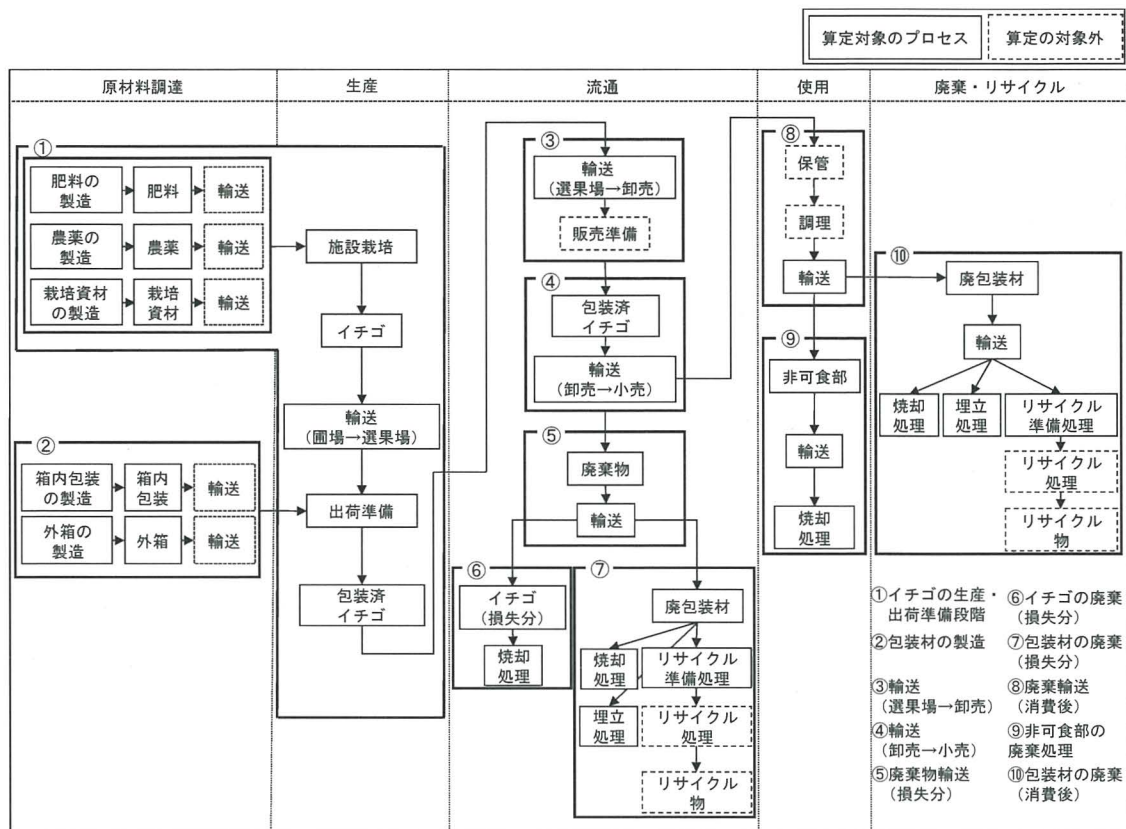


図 1 システム境界  
Fig. 1 System boundary

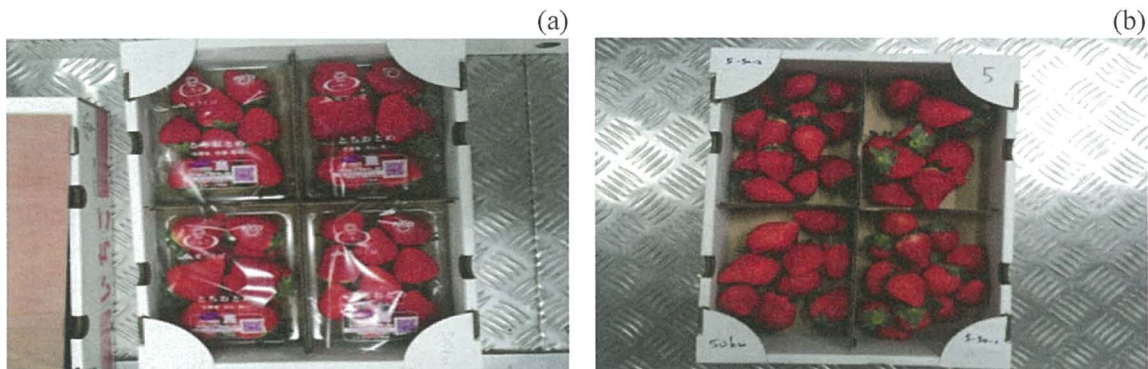


図 2 イチゴの包装の外観 (a: 緩衝あり, b: 緩衝なし)  
Fig. 2 Overview of package for strawberry (left: packaging, right: non-packaging)

### 3. 包装条件

図 2 に、イチゴの包装の外観を示す。(a) は緩衝包装 (PET 製硬質トレイ+OPP 製上掛けフィルム) ありの包装 (以下、「緩衝あり」), (b) は比較対象として設定した出荷容器 (段ボール箱) のみで緩衝包装を用いない包装 (以下、「緩衝なし」) である。緩衝ありでは、硬質トレイ (以下、「パック」) にイチゴを 2 段詰めし、上から上掛けフィルムを貼着する構造となっている。

### 4. 輸送振動試験および損傷評価の方法

輸送振動試験は、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門に設置されている 3 次元振動試験機 (FVH146, 鷲宮製作所) を用いて行った。試験について、日本産業規格 (JISZ0232:2004) (日本産業標準調査会, 2018) では、最も適切な振動試験方法としてランダム振動試験が推奨されている。そこで本研究では、実輸送時の振動データから作成した PSD (Power Spectrum density) を用いてランダム振動試験を実施し

た。振動データは須田ら (2016) による振動調査より得られたものを用いた。用いた振動データは高速道路走行時のものであり、振動は測定中大きく変動しなかったことから、1 フレームの加振時間を 30 s とした。ランダム振動試験では、走行速度 80 km/h で輸送した際に要する時間分だけ同じ波形をイチゴに繰り返し与え、振動時間を変えることで輸送距離をシミュレートし、損傷率を実測値として求めた。輸送距離は、輸送距離の変動に伴う損傷率および環境負荷量の感度分析を実施することを目的に 0~2000 km とした。実験は、実輸送においてあり得る温湿度条件の一例として、温度 20℃、湿度は成り行きとした。輸送振動試験に用いた緩衝ありのイチゴのバック質量は 6.4 g であり、1 バック当たりのイチゴの個数は 13 個である。また、上掛けフィルムおよび段ボール箱の 1 個当たりの質量は、それぞれ 0.8 g および 197.0 g である。試験は図 2 の通り、段ボール箱 1 箱当たりに 4 バックを詰めて行った。

イチゴの損傷評価は中村ら (2007) の方法に従って行った。すなわち、損傷部位の直径および個数を記録し、表面積に対する損傷部位面積の割合を損傷率として算出した。また、試験には収穫直後のイチゴを供試した。パックには複数のイチゴが入っているため、1 果ごとの損傷率を平均し、輸送距離別・包装条件別の損傷率を決定した。イチゴにおける輸送距離ごとの損傷率を表 1 に示す。

### 5. インベントリ分析

表 2~7 にイチゴにおける輸送距離条件別・緩衝包装条件別のインベントリを示した。ここに記載された一次

表 1 イチゴの輸送距離別・包装条件別の損傷率

Table 1 Food loss ratios of strawberry for each transportation distance and each packaging condition

イチゴ	0km	50km	100km	500km	1000km	2000km
緩衝あり	0%	0.86%	2.24%	5.10%	6.24%	8.99%
緩衝なし	0%	5.51%	7.85%	24.22%	36.35%	52.33%

表 2 「① イチゴの生産・出荷準備」から「③ 輸送 (選果場→卸売)」におけるインベントリ表 (輸送距離 0km~100km)

Table 2 Material and energy inputs of 1kg of packed and non-packed strawberry from production to transportation (from collection place to wholesale market) (transportation distance: 0km~100km)

プロセス名	単位	0km		50km		100km	
		緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし
<b>① イチゴの生産・準備段階</b>							
イチゴ生産	kg	1.00	1.00	1.01	1.06	1.02	1.09
<b>② 包装材の製造</b>							
段ボール箱	kg	0.25	0.25	0.25	0.27	0.26	0.27
PET 製包装容器	kg	0.033		0.033		0.034	
上掛けフィルム	kg	0.0041		0.0041		0.0042	
<b>③ 輸送 (選果場→卸売)</b>							
4 トン車	kg	1.29	1.25	1.30	1.33	1.32	1.36

データは、「プラスチック製食品容器包装に関する LCA 調査研究報告書 改訂版」(プラスチック循環利用協会, 2017) に記載されているデータを引用したものである。また、以下に本研究における評価の前提条件をまとめた。農業機械や各種設備(温室を含む)、選果場の機械や建屋、トラック、パレット、流通段階の卸売市場や小売店における保管等、販売準備段階、販売段階におけるエネルギー使用に関しては様々な状況が想定されること、また、データ収集が困難であることから、全て解析の対象外とした。また、販売時にスーパーで使用されると考えられるレジ袋等の包装材、使用段階における冷蔵貯蔵は、緩衝包装と流通時における青果物の損傷の関係を環境負荷の観点から検討するという本研究の目的と合致しないことから、解析の対象外とした。包装資材のリサイクルによる環境影響評価について、リサイクルを環境面から評価する際には考慮しなければならない点がいくつかあり(和田ら, 1996)、それらの評価は複雑であることから、リサイクルによる影響を詳細に検討することは本研究の目的から大きく外れるものと考えられる。よって、リサイクルにおける境界は、同じ素材をまとめて利用できる状態にするリサイクル準備段階までとし、リサイクルによる環境への影響は考慮しなかった。

イチゴの非可食部割合は、文部科学省が公開している「日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂)」(文部科学省, 2015) を参考に、2% に設定した。また、流通段階のイチゴの損失分および消費後の廃棄(非可食部)については、全量焼却するとした。

表 8 にプラスチック容器包装および段ボールの廃棄・リサイクル率および段ボールの回収率を示す。容器包装の廃棄・リサイクル率は、「プラスチックリサイクルの基礎知識 2018」(プラスチック循環利用協会, 2018) を参考に設定した。また、段ボールの回収率は、「段ボールの回収率の推移」(環境省, 2016) を基に決定した。

二次データは MiLCA 付属の LCI データベース IDEA Ver. 1.1 (産業技術総合研究所, 産業環境管理協会) (以

表 3 「④輸送（卸売→小売）」から「⑦包装材の廃棄（損失分）」におけるインベントリ表（輸送距離 0km~100km）

Table 3 Material and energy inputs of 1 kg of packed and non-packed strawberry from transportation (from wholesale market to retail) to disposal of package (by food loss) (transportation distance: 0 km~100 km)

プロセス名	単位	0km		50km		100km	
		緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし
<b>④輸送（卸売→小売）</b>							
4トン車	kg	1.29	1.25	1.29	1.25	1.29	1.25
<b>⑤廃棄物輸送（損失分）</b>							
2トン車	kg	0.00	0.00	0.011	0.073	0.030	0.11
<b>⑥イチゴの廃棄処理（損失分）</b>							
焼却処理	kg	0.00	0.00	0.0087	0.058	0.023	0.085
<b>⑦包装材の廃棄（損失分 焼却）*</b>							
段ボール箱	g	0.00	0.00	0.0072	0.049	0.019	0.071
PET製包装容器	g	0.00		0.014		0.038	
上掛けフィルム	g	0.00		0.0018		0.0047	
<b>⑦包装材の廃棄（損失分 埋立）*</b>							
段ボール箱	g	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PET製包装容器	g	0.00		0.023		0.060	
上掛けフィルム	g	0.00		0.0028		0.0075	

\*「包装材の廃棄」における廃棄物量について、表に記載されている焼却・埋立処理量に対し、その残量は全てリサイクル処理により処理した。

表 4 「⑧廃棄物輸送（損失分）」から「⑩包装材の廃棄（消費後）」におけるインベントリ表（輸送距離 0km~100km）

Table 4 Material and energy inputs of 1 kg of packed and non-packed strawberry from waste transportation (for food loss) to disposal of package (after consumption) (transportation distance: 0 km~100 km)

プロセス名	単位	緩衝あり*	緩衝なし*
<b>⑧廃棄物輸送（損失分）</b>			
2トン車	kg	0.31	0.27
<b>⑨非可食部の廃棄処理</b>			
焼却処理	kg	0.020	0.020
<b>⑩包装材の廃棄（消費後 焼却）**</b>			
段ボール箱	g	0.83	0.83
PET製包装容器	g	4.6	
上掛けフィルム	g	0.57	
<b>⑩包装材の廃棄（消費後 埋立）**</b>			
段ボール箱	g	0.0	0.0
PET製包装容器	g	1.6	
上掛けフィルム	g	0.21	

\* 0km~100kmにおいて、「⑧廃棄物輸送（損失分）」から「⑩包装材の廃棄（消費後）」におけるインベントリは輸送距離に依存しないため、各包装条件において0km~100kmのインベントリは同じ値となる。

\*\*「包装材の廃棄」における廃棄物量について、表に記載されている焼却・埋立処理量に対し、その残量は全てリサイクル処理により処理した。

下、LCIデータベース）におけるインベントリデータを用いた。よって、イチゴの栽培方法はLCIデータベースに従い、施設栽培（加温あり）と仮定した。なお、LCI

データベースにおけるイチゴの栽培データは、「生産費統計」および「産業関連表」のデータによるものである。

全ての段階において、廃棄物の輸送は2t車で行い、輸送距離を50kmとした。また、イチゴの輸送（選果場→卸売、卸売→小売店）はどちらも4t車で行い、「選果場→卸売」間では輸送振動試験により輸送距離を変動させた（表1参照）。「卸売→小売店」間の輸送距離は、茨城県からその産地の主要な出荷先である東京都までの輸送を想定し、50kmとした。なお、LCIデータベースには、イチゴの栽培に関して卸売市場までの輸送が含まれているが、圃場から選果場を経由せず、直接卸売市場に輸送される輸送プロセスとなっており、本研究における評価範囲と異なっている。当データベースでは、圃場から卸売市場間の輸送にかかる負荷のみを考慮しており、卸売市場における電力消費等の負荷は含まれていない。よって、LCIデータベースにおける卸売市場までの輸送の負荷を、本研究における「イチゴの生産→選果場」間の負荷とみなし、「選果場→卸売」間の輸送による負荷は別途検討した。

## 6. 影響領域および影響評価の方法

本研究では、評価対象を国内で生産・流通している青果物としたことから、日本における環境影響評価を対象とした評価手法である日本版被害算定型影響評価手法(LIME2) (伊坪ら, 2010) を用いて特性化, 統合化を行った。重み付けおよび影響領域はLIME2に従った。今回評価を行った影響領域を表9に示す。なお、評価の結果、負荷量が0となった項目については結果から除いた。

特性化結果は以下の式より求めた (伊坪ら, 2007)。

表 5 「① イチゴの生産・出荷準備」から「③ 輸送 (選果場→卸売)」におけるインベントリ表 (輸送距離 500 km~2000 km)

Table 5 Material and energy inputs of 1kg of packed and non-packed strawberry from production to transportation (from collection place to wholesale market) (transportation distance: 500 km~2000 km)

プロセス名	単位	500 km		1000 km		2000 km	
		緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし
<b>① イチゴの生産・準備段階</b>							
イチゴ生産	kg	1.05	1.32	1.07	1.57	1.10	2.10
<b>② 包装材の製造</b>							
段ボール箱	kg	0.27	0.33	0.27	0.40	0.28	0.53
PET 製包装容器	kg	0.035		0.035		0.036	
上掛けフィルム	kg	0.0043		0.0044		0.0045	
<b>③ 輸送 (選果場→卸売)</b>							
4 トン車	kg	1.36	1.65	1.38	1.97	1.42	2.63

表 6 「④ 輸送 (卸売→小売)」から「⑦ 包装材の廃棄 (損失分)」におけるインベントリ表 (輸送距離 500 km~2000 km)

Table 6 Material and energy inputs of 1kg of packed and non-packed strawberry from transportation (from wholesale market to retail) to disposal of package (by food loss) (transportation distance: 500 km~2000 km)

プロセス名	単位	500 km		1000 km		2000 km	
		緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし	緩衝あり	緩衝なし
<b>④ 輸送 (卸売→小売)</b>							
4 トン車	kg	1.29	1.25	1.29	1.25	1.29	1.25
<b>⑤ 廃棄物輸送 (損失分)</b>							
2 トン車	kg	0.069	0.40	0.086	0.72	0.13	1.4
<b>⑥ イチゴの廃棄処理 (損失分)</b>							
焼却処理	kg	0.054	0.32	0.067	0.57	0.10	1.1
<b>⑦ 包装材の廃棄 (損失分 焼却)*</b>							
段ボール箱	g	0.045	0.27	0.055	0.48	0.082	0.91
PET 製包装容器	g	0.088		0.11		0.16	
上掛けフィルム	g	0.011		0.014		0.020	
<b>⑦ 包装材の廃棄 (損失分 埋立)*</b>							
段ボール箱	g	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PET 製包装容器	g	0.14		0.17		0.26	
上掛けフィルム	g	0.018		0.022		0.032	

\*「包装材の廃棄」における廃棄物量について、表に記載されている焼却・埋立処理量に対し、その残量は全てリサイクル処理により処理した。

$$CI_i = \sum_s CF_{i,s} \times LCI_s \quad (1)$$

ここで、 $CI_i$  はカテゴリインディケータ (影響領域  $i$  における特性化結果)、 $CF_{i,s}$  は特性化係数 (物質  $s$  が影響領域  $i$  に及ぼす寄与度)、 $LCI_s$  はインベントリデータ (物質  $s$  の環境負荷量) を表す。なお、特性化結果は個々の影響領域において、各工程またはプロセスが与える環境負荷量を百分率で表し、それらの値を各工程またはプロセスごとの寄与度として結果を示すこととした。

また、統合化結果は以下の式より求めた (伊坪ら, 2007)。

$$SI_e = \sum_i \left[ \sum_s IF_{s,i,e} \times LCI_s \right] \quad (2)$$

ここで、 $SI_e$  は統合化結果、 $IF_{s,i,e}$  は統合化係数 (物質  $s$  が影響領域  $i$ , エンドポイント  $e$  に及ぼす寄与度) を表す。なお、LIME2 における統合化結果は社会コスト (単位: 円) として算出される。社会コストとは、製品の製造に伴い発生しうる健康被害や生物種の減少などの環境問題によって国民全体が被る負担額 (円) を意味する。

ホットスポット分析は、Product Environmental Footprint Category Rules Guidance Version 6.3 (European Commission, 2018) に従った。すなわち、統合化結果における人間・生体毒性を除く環境負荷のうち上位 80%

表 7 「⑧ 廃棄物輸送 (損失分)」から「⑩包装材の廃棄 (消費後)」におけるインベントリ表 (輸送距離 500 km~2000 km)

Table 7 Material and energy inputs of 1 kg of packed and non-packed strawberry from waste transportation (for food loss) to disposal of package (after consumption) (transportation distance: 500 km~2000 km)

プロセス名	単位	緩衝あり*	緩衝なし*
<b>⑧ 廃棄物輸送 (損失分)</b>			
2 トン車	kg	0.31	0.27
<b>⑨ 非可食部の廃棄処理</b>			
焼却処理	kg	0.020	0.020
<b>⑩包装材の廃棄 (消費後 焼却)**</b>			
段ボール箱	g	0.83	0.83
PET 製包装容器	g	4.6	
上掛けフィルム	g	0.57	
<b>⑩包装材の廃棄 (消費後 埋立)**</b>			
段ボール箱	g	0.0	0.0
PET 製包装容器	g	1.6	
上掛けフィルム	g	0.21	

\* 500 km~2000 km において、「⑧ 廃棄物輸送 (損失分)」から「⑩ 包装材の廃棄 (消費後)」におけるインベントリは輸送距離に依存しないため、各包装条件において 500 km~2000 km のインベントリは同じ値となる。

\*\* 「包装材の廃棄」における廃棄物量について、表に記載されている焼却・埋立処理量に対し、その残量は全てリサイクル処理により処理した。

以上を占める影響領域を評価対象とし、影響領域ごとにホットスポットを特定した。

### III 結果および考察

#### 1. イチゴの輸送時におけるホットスポットの特定

吉川ら (2007) は、イチゴの生産から廃棄までの GHG および AS の排出量について、生産段階における負荷がどちらの影響領域においても大半を占める結果を示している。一方、Soode et al. (2015) は、栽培方法や消費段階におけるシナリオの違いにより各プロセスにおける寄与度が大きく変動し、輸送および消費段階における寄与度が最も高くなる場合があることを示している。また、Prosapio et al. (2017) は、影響領域ごとに寄与度が高いプロセスは異なることを示している。このことから、評価対象とするライフサイクルやシナリオに対し、複数の影響領域を考慮した LCA を行うことが重要であり、それぞれのケーススタディごとに寄与度の大きいプロセスを特定することが必要と考えられる。そこで本研究では、イチゴのライフサイクルにおいて複数の影響領域を考慮し、ホットスポットの特定を行った。表 10 に緩衝ありにおける統合化結果を示す。表より、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染における負荷が大きく、全体の上位 80% 以上を占めるものであった。よって、これら 3 つの影響領域を対象として、ホットスポットとなるプロセスの特定および環境負荷が大きくなる要因に

表 8 プラスチックおよび段ボールの廃棄・リサイクル率  
Table 8 Waste and recycle ratios of plastic and cardboard

	焼却	埋立	リサイクル
プラスチック (一般廃棄物)	14%	5%	81%
プラスチック (産業廃棄物)	5%	8%	87%
段ボール箱	0.33%	0.0%	96.7%

表 9 影響領域

Table 9 Impact categories

影響領域	単位
地球温暖化	kg-CO <sub>2</sub> eq
資源消費	kg-Sb eq
酸性化	kg-SO <sub>2</sub> eq
廃棄物	m <sup>3</sup>
光化学オキシダント	kg-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
オゾン層破壊	kg-CFC11 eq
富栄養化	kg-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
人間毒性 (発癌性)	kg-C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> eq
人間毒性 (慢性疾患)	kg-C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> eq
生態毒性 (水域)	kg-C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> eq
生態毒性 (陸域)	kg-C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> eq
土地利用 (維持)	m <sup>2</sup> year
土地利用 (改変)	m <sup>2</sup>
騒音	J
都市域大気汚染	kg-SO <sub>2</sub> eq
室内空気汚染	kg

ついて考察した。

緩衝ありにおける輸送距離別の特性化結果を図 3 に示す。図 3 より全ての輸送距離条件において「イチゴの生産・出荷準備」段階における寄与度が最も大きく、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染において、それぞれ 81.2~92.1%、98.3~99.1%、83.7~90.6% を占める結果となった。よって、イチゴの輸送時における損傷を考慮したライフサイクルでは、イチゴの生産による負荷の影響が最も大きいことが明らかとなった。

「イチゴの生産・出荷準備」段階において、これら影響領域に影響を与えている要因を特定するため、当該段階におけるプロセスごとの特性化を行った。結果を図 4 に示す。図より、地球温暖化および都市域大気汚染では、主に「A 重油の消費」における寄与度が大きく、それぞれ 48.5% および 50.7% となった。吉川ら (2007) は、青果物の施設栽培における負荷について、A 重油の消費による GHG への影響が大きいと報告しており、今回対象としたイチゴの栽培においても同様の結果となった。また、「農業用塩化ビニルフィルムの製造」における寄与度が次いで大きく、それぞれ 13.0% および 18.6% を占める結果となった。一方、資源消費では、「殺虫剤の製造」「殺菌剤の製造」および「その他の農薬の製造」における寄与度が大きく、それぞれ 55.1%、20.2% および 20.2% となった。よって、これらプロセスが、イチゴの栽培における負荷およびホットスポットとなる影響領域に影響

表 10 緩衝ありにおける輸送距離別の統合化結果

Table 10 Single score results of packaging scenario on each transportation distance per 1 kg of no damage strawberry

影響領域		0 km	50 km	100 km	500 km	1000 km	2000 km
地球温暖化	$\times 10^1$	1.30	1.32	1.34	1.41	1.48	1.62
光化学オキシダント	$\times 10^{-2}$	1.25	1.26	1.28	1.31	1.34	1.38
資源消費	$\times 10^0$	6.67	6.75	6.85	7.18	7.48	8.05
酸性化	$\times 10^{-1}$	5.40	5.48	5.59	6.10	6.62	7.68
廃棄物	$\times 10^0$	1.97	2.04	2.16	2.43	2.54	2.82
富栄養化	$\times 10^{-5}$	6.27	6.32	6.44	6.66	6.76	6.98
生態毒性 (大気)	$\times 10^{-1}$	2.02	2.03	2.06	2.12	2.16	2.22
生態毒性 (水圏)	$\times 10^{-3}$	1.65	1.66	1.68	1.73	1.76	1.81
都市域大気汚染	$\times 10^0$	6.11	6.18	6.28	6.62	6.93	7.54
人間毒性 (大気)	$\times 10^{-2}$	1.53	1.54	1.56	1.61	1.64	1.69
人間毒性 (水圏)	$\times 10^{-5}$	6.64	6.70	6.77	6.98	7.11	7.31
合計	$\times 10^1$	2.85	2.89	2.94	3.12	3.27	3.57

社会コスト (円)

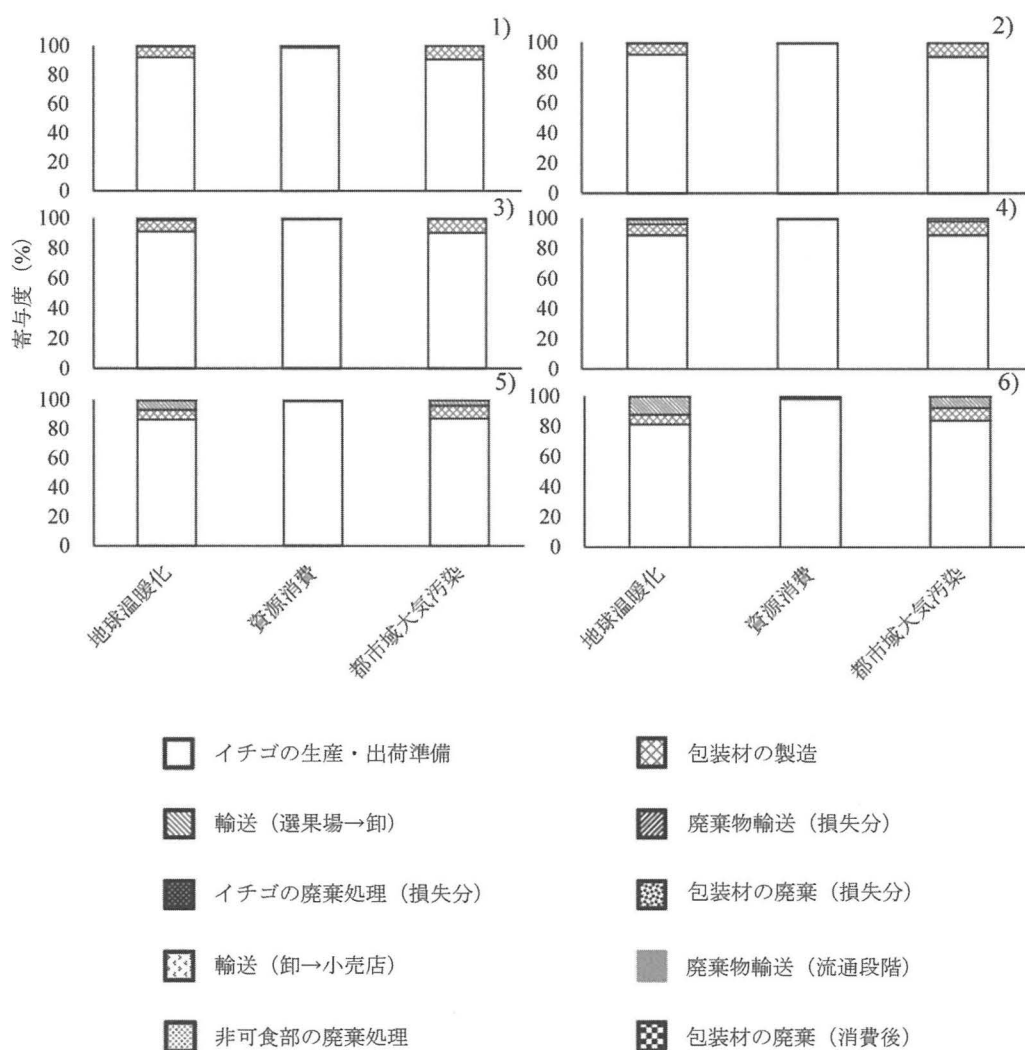


図 3 緩衝ありにおける輸送距離別の特性化結果

1), 2), 3), 4), 5), 6) はそれぞれ輸送距離 0, 50, 100, 500, 1000, 2000 km における結果を表す。

Fig. 3 Characterized results of packaging scenario for each transportation distance

1), 2), 3), 4), 5), 6) show the results for transportation distance of 0, 50, 100, 500, 1000, 2000 km, respectively.

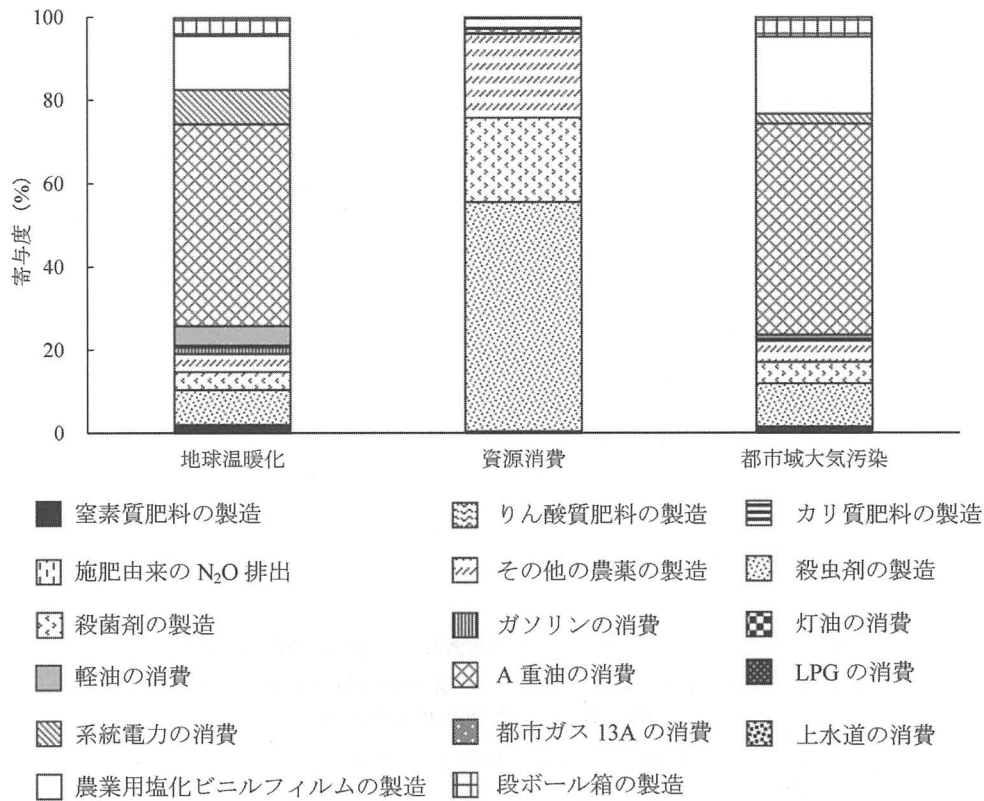


図 4 「イチゴの生産（施設栽培）・出荷準備」段階における特性化結果

Fig. 4 Characterized results of strawberry cultivation process (greenhouse)

を与えることが明らかとなった。

また、図 3 において、「イチゴの生産・出荷準備」段階に次いで「包装材の製造」段階における環境負荷の寄与度が大きく、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染において、それぞれ 6.6~7.4%、0.74~0.77%、8.6~9.3% となった。また、このプロセスにおける負荷は、イチゴの生産量の増加と共に上昇するものの、その寄与度は「イチゴの生産・出荷準備」段階と比較して、輸送距離の変動による変化があまり起こらない結果となった。「イチゴの生産・出荷準備」段階における寄与度 (81.2~99.1%) と比較すると、当該プロセスの寄与度は低い値ではあるが、輸送距離によらず常に一定の程度を占めていることから、包装の軽量化など、製造に伴う資材の投入量を減少させることで環境負荷は削減可能であると考えられる。その際、損傷発生とのトレードオフを加味した最適化が期待される。ここで、「包装材の製造」段階において負荷の大きいプロセスを特定するため、輸送距離 0 km 時の「包装材の製造」段階における特性化結果を図 5 に示す。図 5 より、「段ボール箱の製造」における寄与度が、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染でそれぞれ 68.1%、57.8%、69.7% を占め、また、「プラスチック容器の製造」における寄与度はそれぞれ 28.2%、37.6%、26.6% となり、これら 2 つのプロセスによる負荷が「包装材の製造」段階において大きいことが明らかとなっ

た。よって、これらのプロセスにおける負荷の削減が、「包装材の製造」の負荷の減少に貢献するものと考えられる。

更に、図 3 において、輸送距離の増加に伴い「輸送 (選果場→卸売)」における寄与度は、地球温暖化および都市域大気汚染でそれぞれ 0~11.7%、0~7.4% と変動し、地球温暖化において 10% 以上の寄与度を示す結果となった。これらの影響領域における負荷は、輸送距離の増加に伴い上昇することから、長距離輸送を行う際には、船や鉄道での輸送などモーダルシフトによる環境負荷低減の検討が必要であると考えられる。一方、Soode-Schimonsky et al. (2017) は、海上輸送における輸送では、その輸送時間の増大により品質の低下等が引き起こされることから、イチゴにおいては適切ではないとしている。青果物は、収穫後も呼吸を行い、それに伴い鮮度の低下や品質劣化が生じる (内野, 2015)。よって、長距離 (長時間) 輸送におけるモーダルシフトを検討する際は、青果物の呼吸およびそれに伴う品質劣化の影響を考慮する必要がある。

## 2. 緩衝包装の有無が環境負荷に及ぼす影響

表 11 に各影響領域における緩衝ありの緩衝なしに対する特性化結果から得られた削減率を示す。表 11 より、輸送距離に対応する地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染における環境負荷の削減率は、それぞれ -2.6~

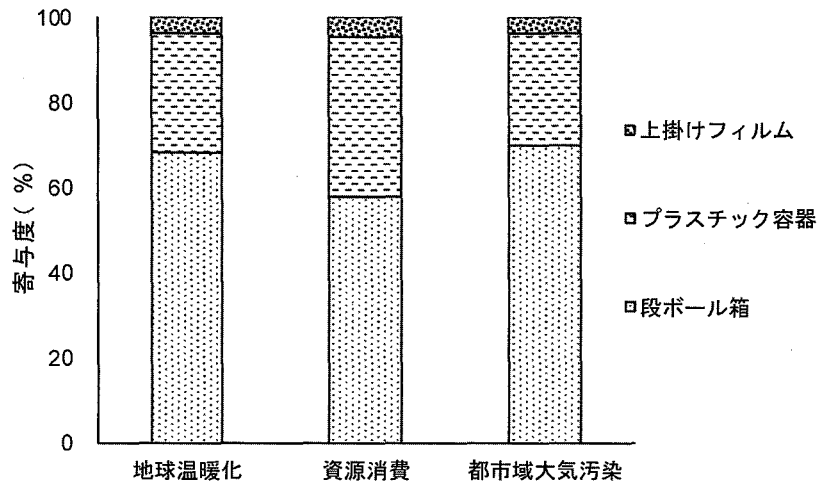


図 5 「包装材の製造」段階における輸送距離 0km の特性化結果

Fig. 5 Characterized results of package production process (transportation distance: 0 km)

表 11 各影響領域における緩衝ありの緩衝なしに対する特性化結果の削減率

Table 11 Reduction ratios for packaging scenario compared with non-packaging scenario in each impact category

削減率 (%)	0km	50km	100km	500km	1000km	2000km
地球温暖化	-2.6	2.4	3.9	18.3	30.3	46.5
資源消費	-1.0	4.5	6.1	20.3	31.7	47.3
都市域大気汚染	-2.8	1.9	3.5	18.2	30.0	46.1

46.5%, -1.0~47.3%, -2.8~46.1%となり, 輸送距離の増加に伴い削減率が大きくなる傾向となった。図 3 より, 「イチゴの生産・出荷準備」段階における寄与度が最も大きい (81.2~99.1%) ことから, 包装条件の違いによる損傷率の差から生じる追加的なイチゴ生産量の差, つまり機能単位当たりのイチゴ生産量の差が各影響領域における環境負荷量に大きく影響を及ぼすと考えられる。すなわち, 輸送距離の増加に伴い損傷率の差が大きく開いたため, 削減率が増加したと考えられる。よって, 青果物における損傷抑制の観点から, 包装容器は環境負荷の増加抑制効果を有することが示され, 包装容器を用いることでその環境負荷は, 包装を行わない場合に対して大幅に削減されることが明らかとなった。また, 輸送距離 0km において全ての影響領域で削減率が負の値 (-2.8~-1.0%) となり, 0km においては緩衝なしの方が少ない負荷となった。これは, 輸送が行われていないため, どちらの包装条件でも損傷率が 0% であったこと, また, 緩衝なしではバックを用いないため, 輸送用の段ボール箱の負荷のみが「包装材の製造」に計上されており, プラスチック包装材の製造の負荷が計上されている緩衝ありよりも環境負荷が小さくなったことが原因と考えられる。

### 3. 環境負荷削減に向けたプロセスの改善について

初めに, 「イチゴの生産・出荷準備」段階がライフサイクルにおいて最も高い寄与度を示したことから, この

段階における負荷削減について考察する。栽培方法における生産段階の環境負荷低減の手段として, Soode-Schimonsky et al. (2017) は, ドイツにおけるイチゴの生産段階の環境負荷低減の手段として, ハウス栽培 (加温なし), 温室栽培および慣行農法について比較を行い, ハウス栽培 (加温なし) および慣行農法における収量当たりの負荷が温室栽培のそれよりもそれぞれ 85% および 95% 低い結果を示している。よって, ハウス栽培 (加温なし) および慣行農法への転換による生産段階における環境負荷低減の検討も効果的であると考えられる。本研究におけるイチゴの栽培 (施設栽培, 加温あり) においてハウス栽培 (加温なし) および慣行農法を適用した場合に, 生産段階における負荷が単純に 85% および 95% 削減されたと仮定して試算を行った。すなわち, 輸送距離 2000 km における環境負荷のうち, 栽培工程のみの負荷を 85% および 95% 削減させ, その値を農法の変更時における栽培工程の負荷とし, ライフサイクルの環境負荷量を算出した。その結果, 本研究における緩衝ありのイチゴの栽培に対してハウス栽培 (加温なし) を適用した場合, 特性化結果における地球温暖化, 資源消費および都市域大気汚染の負荷はライフサイクル全体でそれぞれ 69%, 84%, 71% 削減され, 大幅な削減効果が得られる結果となった。更に, 慣行農法を適用した場合には, 特性化結果における地球温暖化, 資源消費および都市域大気汚染の負荷はライフサイクル全体でそれぞれ 77%,

93%, 79% 削減される結果となった。よって、イチゴの栽培方法において、ハウス栽培（加温なし）および慣行農法への変更による環境負荷の削減は非常に高いポテンシャルを持つといえる。他にも、トマトの施設栽培における温室の加温について、Dias et al. (2017) は、バンカー重油および天然ガスの代わりにバイオマス資源としてヤナギの木の端材を用いることで、GHG およびオゾン層破壊における負荷をそれぞれ 72% および 78% 減少したと報告している。吉川ら (2007) および Soode-Schimonsky et al. (2017) の報告より、施設栽培における環境負荷は施設の加温による影響が大きく、本研究におけるイチゴの施設栽培においても同様に、加温による影響が大きいと考えられるため、加温時に再生可能エネルギーを用いることも、生産段階における負荷削減に有効であると考えられる。

また、吉川ら (2007) は、GHG および AS の排出量の定量化に加えて、それらの結果に環境負荷削減シナリオを適用した際の削減ポテンシャルについても報告している。環境負荷の削減シナリオとして地産地消による輸送の最適化、モーダルシフト（モーダルシフト化率 50%）、栽培時の施肥量の 20% 低減および施設栽培における省エネルギー化等を行い、いずれの方法においても GHG および AS の両方で削減効果があることを報告している。よって、イチゴの流通プロセスにおいてもこれらの削減シナリオを適用することで、ライフサイクルにおける環境負荷の低減が可能であると考えられる。実際に、緩衝ありにおける輸送距離 2000 km において、モーダルシフトの適用による負荷削減の試算を行ったところ、輸送の一部を鉄道輸送に変更した場合（モーダルシフト化率 50%）、「輸送（選果場→卸売）」における特性化結果の負荷は地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染でそれぞれ 48%, 47%, 49% 削減され、ライフサイクル全体ではそれぞれ 6%, 1%, 4% の削減効果が得られた。この結果から、モーダルシフトによる環境負荷の削減効果が示された。しかし、モーダルシフトによる削減効果を評価する際には、前述の通り輸送手段の違いによる輸送時間およびその間の青果物の呼吸による品質劣化の影響を考慮する必要がある。また、Nakanishi et al. (2015) は、トラック輸送および鉄道輸送では、輸送物の振動特性が異なることを報告している。振動特性が異なれば、輸送物の損傷率も変動すると考えられることから、今後はこれらを考慮した評価を行う必要がある。

容器包装における負荷削減の検討として、「包装材の製造」段階において最も高い寄与度を示した「段ボール箱の製造」における負荷の削減が効果的であると考えられる。その際、その製造にかかる負荷自体の削減の検討も重要であるが、容器の繰り返し利用による 1 回使用当たりの負荷を低減させることも、ライフサイクルの負荷低減に効果的であると考えられる。折笠ら (2014) は、ダイコン輸送時において、ワンウェイ利用の段ボールと

繰り返し利用が可能な大型のバルクコンテナについて CO<sub>2</sub> 排出量の比較を行い、輸送時におけるバルクコンテナの繰り返し利用による環境負荷の削減効果について報告している。バルクコンテナ輸送では、容器製造時における CO<sub>2</sub> 排出量が段ボールのそれと比べて小さくなり、バルクコンテナの利用により段ボール利用時に対して CO<sub>2</sub> 排出量が 38% 削減されることが示されている。また、Soode-Schimonsky et al. (2017) も同様に、輸送時に再利用可能なプラスチック製容器を用いることは、ワンウェイの段ボール箱を用いるよりも、環境面からみて良いと報告している。よって、輸送容器としてプラスチック製容器の繰り返し利用による検討も、環境負荷低減の手段として効果的と考えられる。

今回は特定の緩衝包装についてのみ着目し、その環境負荷に与える影響の評価を行った。しかし、今回取り上げた緩衝包装以外にも、イチゴ用の包装は存在する。最適包装条件の解明に資する知見を深めるためにも、複数の包装条件について評価を行い、緩衝包装の違いによる損傷率と環境負荷の関係を明らかにする必要があると考えられる。

#### IV 摘 要

LCA による影響領域間のトレードオフを考慮した環境影響評価より、イチゴのライフサイクルにおいて、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染における負荷が大きいことが明らかとなった。輸送時における青果物の損傷を考慮し、緩衝包装が環境負荷に及ぼす影響を評価した結果、「イチゴの栽培（施設栽培）・出荷準備」段階における負荷が大きいことが示され（寄与度：81.2~99.1%）、イチゴのライフサイクルにおける環境負荷のホットスポットが明らかとなった。緩衝包装は輸送時のイチゴに生じる損傷を減少させ、損傷分の補填のために行われる追加的なイチゴの生産に伴う環境負荷の発生を抑制することから、緩衝なしに対する緩衝ありの環境負荷は、地球温暖化、資源消費および都市域大気汚染でそれぞれ -2.6~46.5%, -1.0~47.3%, -2.8~46.1% 削減される結果となった。また、ホットスポットとなるプロセスに対し、環境負荷削減シナリオについて検討したところ、栽培方法の変更やモーダルシフトの導入により大幅な環境負荷削減の可能性が示され（削減率はそれぞれ最大で 93% および 49%）、緩衝ありにおいても更なる環境負荷低減の可能性が示された。

#### V 謝 辞

本論文の作成にあたり、プラスチック循環利用協会の和泉昭宏氏をはじめ、同協会の調査研究委員ならびにプラスチック製食品容器包装評価委員の方々にはインベントリの収集等において御協力頂きました。深く感謝の意を表します。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17K08015（基盤研究 C）、JP16H05001（基盤研究 B）

およびJP17H01499 (基盤研究A) によって実施されました。

### References

- 馬場紀子, 江島亜祐子, 大石高也, 折野太陽, 車 政弘, 安部正剛, 宮崎良忠, 樺島 勝, 渡邊健太郎, 2012. 宙吊り型イチゴ用出荷容器の開発 第1報 宙吊り容器の傷防止効果. 福岡県農業総合試験場研究報告, 31, 27-31.
- Dias G.M., Ayer N.W., Khosla S., Acker R.V., Young S.B., Whitney S., Hendricks P., 2017. Life cycle perspectives on the sustainability of Ontario greenhouse tomato production. *Journal of Cleaner Production*, 140 (2), 831-839.
- European Commission, 2018. Product Environmental Footprint Category Rules Guidance Version6.3. [http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR\\_guidance\\_v6\\_3.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6_3.pdf). Accessed Jan. 30, 2019.
- FAO, 2011. Global food losses and food waste. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e.pdf>. Accessed Jan. 30, 2019.
- Girgenti V., Peano C., Baudino C., Tecco N., 2014. From "farm to fork" strawberry system. *Science of the Total Environment*, 473-474, 48-53.
- IPCC, 2014. CLIMATE CHANGE 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Summary for Policymakers. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5\\_wgII\\_spm\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_en.pdf). Accessed Jan. 30, 2019.
- Ishikawa, Y., Kitazawa, H., Shiina, T., 2009. Vibration and Shock Analysis of Fruit and Vegetables Transport. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 43 (2), 129-135.
- 伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦, 2007. LCA シリーズ LCA 概論. 社団法人産業環境管理協会, 東京, 246, 257.
- 伊坪徳宏, 2009. ライフサイクルの視点に基づく環境影響評価. —ライフサイクルアセスメントの特徴とその手順—. *精密工学会誌*, 75 (9), 1062-1067.
- 伊坪徳宏, 稲葉 敦, 2010. LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法. 社団法人産業環境管理協会, 東京.
- 環境省, 2016. 段ボールの回収率の推移. <http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/4shou.html#4shou>. Accessed Jan. 30, 2019.
- 経済産業省, 2016. JIS に即した包装の環境配慮設計に関する手引き. [http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/JIS\\_tebiki.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/JIS_tebiki.pdf). Accessed Jan. 30, 2019.
- 北澤裕明, 石川 豊, 路 飛, 胡 耀華, 中村宣貴, 椎名武夫, 2010. イチゴの輸送中の衝撃解析と損傷発生予測. *園芸学研究*, 9 (2), 221-227.
- 文部科学省, 2015. 日本食品標準成分表 2015 (七訂) 果実類. [http://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/science/detail/\\_icsFiles/fieldfile/2016/01/15/1365343\\_1-0207r2\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/fieldfile/2016/01/15/1365343_1-0207r2_1.pdf). Accessed Jan. 30, 2019.
- 中村宣貴, 梅原仁美, 岡留博司, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫, 2007. 振動周波数及び振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響. *農業施設*, 38 (2), 101-108.
- 中村宣貴, 梅原仁美, 根井大介, 岡留博司, 石川 豊, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫, 2008. 包装条件の違いがイチゴ果実の損傷に及ぼす影響. *農業施設*, 39 (6), 1-8.
- Nakanishi, Y., Nakamura, N., Hasegawa, N., Inamori, H., Ogawa, Y., Kitazawa, H., 2015. Evaluation and Estimation of Damage to Tree-Ripened 'Irwin' Mangos from Repetitive Shock during Transportation. *Tropical Agriculture and Development*, 59 (3), 112-117.
- 日本包装技術協会, 1996. 包装って何?: 包装の正しい理解のために 第1部 包装とは何か (第2版). 公益社団法人日本包装技術協会, 東京, 8.
- 日本産業標準調査会, 2018. 包装貨物-振動試験方法 (JISZ0232). <https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html>. Accessed Jul. 23, 2019.
- 折笠貴寛, 中村宣貴, ロイボリトシユ, タンマウオンマナスイカン, 兼田朋子, 吉田 誠, 曾我綾香, 大野誠治, 新實誉也, 横山幸一, 西尾 恵, 小出章二, 椎名武夫, 2014. 新規バルクコンテナを利用したダイコン流通プロセスにおける CO<sub>2</sub> 排出量削減の可能性. *日本包装学会誌*, 23 (4), 293-304.
- プラスチック循環利用協会, 2017. プラスチック製食品容器包装に関する LCA 調査研究報告書 改訂版.
- プラスチック循環利用協会, 2018. プラスチックリサイクルの基礎知識 2018. <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panfl.pdf>. Accessed Jan. 30, 2019.
- Prosapio V., Norton I., De Marco I., 2017. Optimization of freeze-drying using a Life Cycle Assessment approach: Strawberries' case study. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1171-1179.
- 首相官邸, 2016. 青果物・花き・茶の輸出力強化に向けた対応方向. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/pdf/himmoku2.pdf>. Accessed Jan. 30, 2019.
- Soode E., Lampert P., Weber-Blaschke G., Richter K., 2015. Carbon footprints of the horticultural products strawberries, asparagus, roses and orchids in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 87, 168-179.
- Soode-Schimonsky E., Richter K., Weber-Blaschke G., 2017. Product environmental footprint of strawberries. *Journal of Environmental Management*, 203 (1), 564-577.
- 須田 崇, 若井宗人, 菅原宏智, 中村宣貴, 椎名武夫, 2016. 日本における国内チルド輸送振動調査. *日本包装学会 第25回年次大会 研究発表会 予稿集*, 兵庫, 76-77.
- Tabatabaie S.M.H., Murthy G.S., 2016. Cradle to farm gate life cycle assessment of strawberry production in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 127 (20), 548-554.
- 高野和夫, 繁田充保, 久保田尚浩, 多田幹郎, 2006. 完熟モモ流通のための収穫適期, 鮮度保持および輸送方法の検討. *園芸学研究*, 5 (2), 179-184.
- 多々良 泉, 辻 聡宏, 御厨初子, 田中政信, 劉 蛟艶, 小島孝之, 太田英明, 1999. 輸送工程で発生する振動がイチゴの呼吸速度および品質に及ぼす影響. *日本食品保蔵科学会誌*, 25 (1), 15-20.
- 内野敏剛, 2015. 第2章 農産物物性と生理. 豊田浄彦, 内野敏剛, 北村 豊編, *農産プロセス工学 (第1版)*. 文永堂, 東京, 31-32.
- 和田安彦, 三浦浩之, 中野加都子, 1996. LCA におけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価方法とその適用. *土木学会論文集*, (539/II-35), 155-165.
- Williams H., Wikström F., Löfgen M., 2008. A life cycle perspective on environmental effects of customer focused packaging development. *Journal of Cleaner Production*, 16 (7), 853-859.
- 吉川直樹, 天野耕二, 島田幸司, 2007. 日本の青果物消費に伴う環境負荷とその削減ポテンシャルに関する評価. *環境システム研究会論文集*, 35, 499-509.

(受付: 2019年2月5日・受理: 2019年11月4日・  
質問期限: 2020年3月31日)