

令和2年度 環境省委託業務

令和2年度 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
(バイオポリエチレン家具3Dプリント製造実証事業)
委託業務

成果報告書

令和3年3月

学校法人慶應義塾

令和2年度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 (バイオポリエチレン家具3Dプリント製造実証事業) 委託業務 成果報告書サマリー

目的: 化石資源由来ポリエチレンをバイオポリエチレンとバイオマス由来のフィラーのコンパウンドに代替した素材による、リサイクル可能な家具の3Dプリント製造方法の開発を行い、同製造方式にもとづくライフサイクル評価検討により、コストに見合ったバイオポリエチレン素材普及と新たな循環型ビジネスの実証を行う。

1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの技術開発

昨年度の開発より層間接着力と収縮抑制効果があり3Dプリントに適合する可能性が見出された2種のバイオポリエチレン・コンパウンド;

(a) 繊維が長めのセルロース・ファイバー

についてはフィラーの分散性を改善するための混練加工機の使用、

(b) セルロース・ナノ・ファイバー (CNF) 「変成セルロース」

については脆性と着色の改善を試み、椅子の3Dプリント製造実証が可能となるコンパウンドが得られた。ただし(a) (b)ともに褐色の着色が見られる課題が残った。

(a)の結果から

(c) セルロースの長さを最適化し、混練加工方法の工夫

を行ったところ、フィラーの凝集と着色が改善されたものが得られ、これで3Dプリント適合性のうち、層間接着力とフィラー分散性のあるコンパウンドとその混練方法が獲得できた。

着色の問題については、

(d) 紙パウダー

を配合できる独自技術を有するメーカーが見つかり、バイオポリエチレンとの混練試作を行ったところ、分散性にすぐれ白色のコンパウンドが得られたが、収縮抑制効果が劣ることがわかった。

これら4種のコンパウンドを素材とする実寸椅子の3Dプリント製造実験では、椅子形状の成型が可能であることが確認されたが、それぞれに着色、フィラー分散性、収縮抑制効果のいずれかに解決すべき課題が残っている。 耐候性試験は、7年相当の促進試験の一年相当分の検証を行った。

2. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験

3D プリント製造の制約と快適性を統合した椅子の基本モデル設計を行い、本年度開発したバイオポリエチレン・コンパウンドから3Dプリントに適合する材料を用いて、大型3Dプリンタにより椅子形状20脚の製造を行ない、それぞれのコンパウンドの特性に対応する3Dプリント椅子設計製造条件を見だし、うち2脚については強度試験により、業界標準規格を満たすことが実証できた。また製造された椅子からペレット再生を行った材料での製造実験を行い、3Dプリント製家具のマテリアル・リサイクルの課題と可能性が見出せた。着色剤による紫外線劣化防止効果の検証にも着手した。

製品としての家具とするには、強度を保ったまま軽量で製造時間が短くできる形状設計と製造方法、材料の着色性と収縮抑制効果、フィラー凝集による表面のざらつきなどの改善が必要である。また金型成型による従来製品に対し優位性を持たせるには、3Dプリント生産方式の多品種変量製造を活かすカスタマイズ家具の設計・製造方法の検証が必要である。

3. LCA の検証・評価

本実証事業は、金型製造に代わって3Dプリント製造を家具製造に導入することによる下記3点の特徴がある。まず1点目は、3Dプリンタが金型生産に比べて約10分の1の省電力であり、脱炭素化に貢献すること。2点目は、3Dプリンタは大量生産と異なり個別生産が可能であるため、マス・カスタマイゼーションというバイオ材料の価格高騰分に見合う新たな付加価値を与えることができること。3点目は現在のポリエチレン家具は98%が輸入品であるが、安全で騒音が少ない3Dプリンタであれば国内に配備することが進みやすく、結果的に国際輸送に伴う炭素を減らしていくことができる点である。

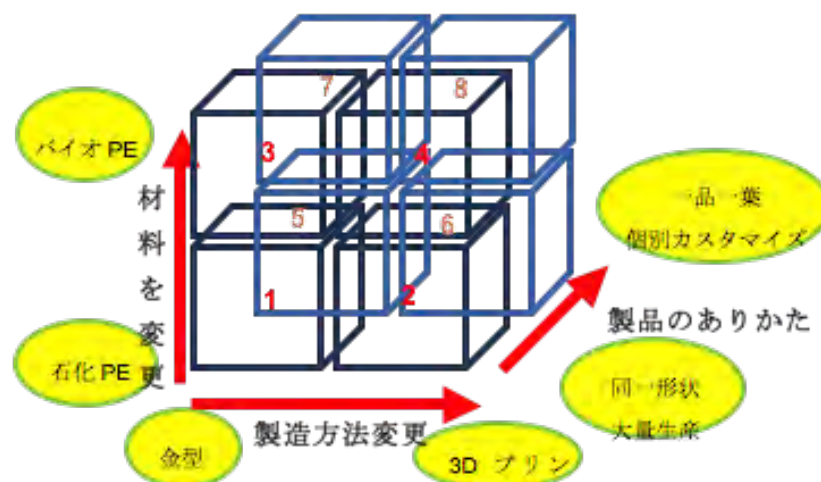
そこで本年度は、従来生産方式(金型回転成形)と3Dプリント生産方式、材料(石油由来とバイオ材)、生産量と品種の多寡、の組み合わせ8シナリオにおいて椅子製品製造のGHG 排出量比較を行った。

エネルギー起源、非エネルギー起源の GHG 排出量は、ともに3Dプリントによるバイオポリエチレン家具は脱炭素化に大きく貢献する結果(GHGマイナス)を示しており、脱炭素社会に向けてきわめて有望な技術であることが示された。この算定結果は、製造実験段階の数値、一部推定値に基づいており、評価対象製品、代替製品、生産・リサイクル・プロセスを明確にして精緻化を行う必要がある。

3 軸による 8 つのシナリオ

1. 石化PE × 金型 × 同じものの大量生産
2. 石化PE × 3D プリンタ × 同じものの大量生産
3. バイオPE × 金型 × 同じものの大量生産
4. バイオPE × 3D プリンタ × 同じものの大量生産
5. 石化PE × 金型 × ひとつずつ異なるもの(カスタマイズ)
6. 石化PE × 3D プリンタ × ひとつずつ異なるもの(カスタマイズ)
7. バイオPE × 金型 × ひとつずつ異なるもの(カスタマイズ)
8. バイオPE × 3D プリンタ × ひとつずつ異なるもの(カスタマイズ)

代替



Biopolyethylene Furniture 3D Print Manufacturing Demonstration Project Results Report 2020, Summary

Objective: To develop a method for manufacturing recyclable furniture by 3D printing using a compound of biopolyethylene and biomass-derived filler as an alternative to fossil resource-derived polyethylene, and implement lifecycle assessment based on that manufacturing method, with a view to disseminating biopolyethylene materials commensurate with cost and demonstrating a new resource recycling-oriented business.

1. Development of technology for 3D-printable biopolyethylene compound pellets

Last year's development revealed that two types of biopolyethylene (PE) compound are effective in terms of interlaminar adhesion, contraction limitation, etc. and have the potential for compatibility with 3D printing. Concerning (a) long-fiber cellulose fibers, a kneading machine was used to improve the filler dispersion, while concerning (b) cellulose nanofiber (CNF) "modified cellulose", improvements were made in terms of brittleness and coloring, and a compound that could be used in the 3D print manufacturing demonstration of a chair shape was obtained. However, a common issue observed in both (a) and (b) was brown coloring. From the results of (a), (c) the kneading method was modified by optimizing the length of the cellulose. On doing this, improvements were obtained in terms of the filler cohesion and coloring, making it possible to acquire a compound endowed with interlaminar adhesion and filler dispersion. Concerning the issue of coloring, a manufacturer that has unique technology for blending (d) paper powder was found, and on conducting a kneading trial with biopolyethylene, a compound possessing excellent dispersion and white color was obtained, although the contraction limiting effect was found to be diminished.

In demonstration of 3D print manufacturing of full-scale chairs using these four compounds as the raw material, it was confirmed that the chair shape can be molded, however, in each of the cases, issues remained regarding either coloring, filler dispersion or the contraction limiting effect.

2. Demonstration experiment concerning 3D printing of a chair shape

Upon designing a chair shape model that integrates limitations of the 3D print manufacturing method with comfort, a total of 20 chairs were manufactured by large 3D printer using 3D print-compatible materials derived from the bio PE compounds developed in this fiscal year, and the 3D print chair design and manufacturing conditions commensurate with the characteristics of each compound were identified. Concerning two of the chairs, durability testing demonstrated that furniture industry standards are satisfied. Moreover, a manufacturing experiment was conducted using pellet materials recycled from the manufactured chairs, and this revealed issues and possibilities regarding the material recycling of 3D printed furniture.

To achieve product-standard furniture, it is necessary to have a shape design and manufacturing method that

is light and can shorten manufacturing time without compromising strength, effectiveness in terms of limiting the material coloring and contraction, and improvement of surface roughness, etc. arising from the filler cohesion.

Moreover, in order to impart superiority over conventional products made by die molding, it is necessary to verify a method for designing and manufacturing customized furniture that makes use of a multi-variety variable 3D print manufacturing system.

3. LCA verification and assessment

This demonstration project has the following three characteristics resulting from introducing 3D printing instead of die molding to the manufacture of furniture. First, the 3D printer makes a contribution to decarbonization because it uses approximately one tenth of the electric power compared to die production. Second, because the 3D printer can conduct individual production unlike mass production, it can impart the new added value of mass customization to countervail rising prices of biomaterials. And third, whereas 98% of current polyethylene furniture is imported, 3D printers, which are inexpensive and quiet, can be easily deployed in Japan, thereby enabling carbon arising from international transportation to be reduced.

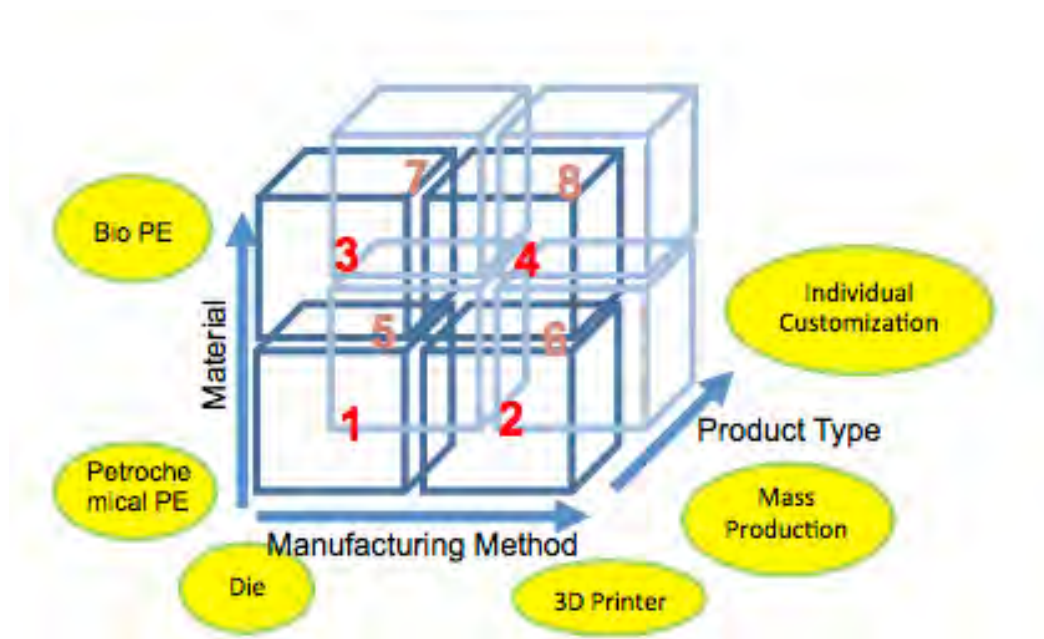
Accordingly, this fiscal year, comparison of GHG emissions in chair product manufacturing was conducted for eight scenarios entailing combinations of the conventional production method (rotary die molding), 3D printing production method, different materials (petroleum-derived and biomaterials), different production volume, and number of product varieties.

GHG emissions arising from energy sources and non-energy sources revealed that biopolyethylene furniture made by 3D printing can make a large contribution in terms of decarbonization (negative GHG), indicating that this is an extremely promising technology for realizing a carbon-free society. Since these calculation findings reflect figures from the manufacturing experimentation stage and include some estimate values, it will be necessary to further elaborate upon clarifying the target products for evaluation, alternative products, and the production and recycling processes.

Eight scenarios based on three axes

1. **Petrochemical PE x Die x Same shape/mass production**
2. Petrochemical PE x 3D printer x Same shape/mass production
3. Bio PE x Die x Same shape/mass production
4. Bio PE x 3D printer x Same shape/mass production
5. Petrochemical PE x Die x One-part one-sheet/individual customization
6. Petrochemical PE x 3D printer x One-part one-sheet/individual customization
7. Bio PE x Die x One-part one-sheet/individual customization
8. **Bio PE x 3D printer x One-part one-sheet/individual customization**

Alternatives



目 次

1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの技術開発	1
1-1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの 技術開発の目的	3
1-2. フィラーの選定によるコンパウンドペレット試作	4
1-3. 3D プリント造形性評価	8
1-4. バイオポリエチレン・コンパウンドの耐候性試験	15
1-5. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの 技術開発の課題	18
 2. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験	 21
2-1. 椅子形状の3D プリントに関する実証実験の目的	23
2-2. 大型3D プリンタの成型方式	23
2-3. 3D プリント製造椅子の評価検証方法	24
2-4. 椅子形状の3D プリント実証実験結果	25
2-5. 再生ペレットによる3D プリント製造実験	35
2-6. 着色剤の検討	36
2-7. 個別カスタマイズの検討	37
2-8. 椅子形状の3D プリント実証実験の課題	38
(資料 2-1) 3D プリント製造椅子の強度試験結果	39
(資料 2-2) 椅子形状の3D プリントに関する実証実験一覧	42
 3. LCA の検証・評価	 45
3-1. LCA 検証・評価の目的	47
3-2. 調査範囲	47
3-3. 影響領域と影響評価手法	53
3-4. ライフサイクルインベントリ分析(LCI)	53
3-5. ライフサイクル影響評価(LCIA)	63
3-6. 課題	81
3-7. 引用文献	82
3-8. LCA ソフトウェアへの実装の詳細	83

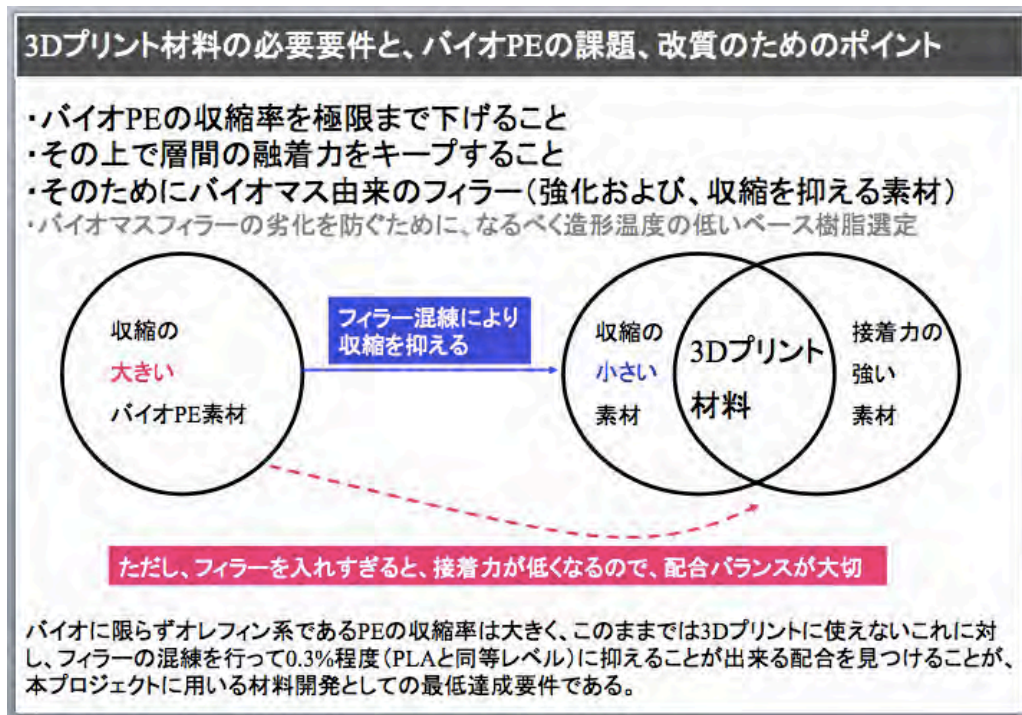
1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・ コンパウンド・ペレットの技術開発

1-1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの技術開発の目的

3D プリント時に重要なファクターである熔融粘度・層間融着力・収縮率を考慮しながら主材となるバイオポリエチレンの選定し、収縮抑制効果のよいバイオマス由来のフィラー（セルロースナノファイバーなど）の配合割合を決め、炭化の防止など独特のノウハウを有するコンパウンド専門メーカーの知見を参考に、バイオポリエチレンとの混練試作を行い、得られたバイオポリエチレン・コンパウンドにて、3D プリント造形性評価・強度評価を行う。一般にフィラーの配合を多くするほど「収縮抑制」ができるが、副作用として「層間融着力」も低下してしまう。家具製作に必要十分な「収縮抑制」を達成しつつ、十分な「層間融着力」を保持しているフィラーと配合（フィラー含有量）を、3D プリントによる評価実験により見極める。また造形評価の定まったコンパウンドにつき耐候性の検証試験と、紫外線吸収剤、光安定剤添加による耐候性向上の効果検証を行う。

■ FDM 用材料として求める性能

本バイオポリエチレン家具 3D プリント製造実証事業においては、現時点で世界に存在する 3D プリント方式でバイオ PE を使用可能な唯一の工法である「FDM 方式」に適合する材料を開発する。FDM 方式の説明、特徴などについては昨年度の報告書にも記載のため省略する。FDM 方式で使用する材料には「収縮率の低さ」「積層間の融着力」が求められることが分かっているため、この 2 つの性能の両立が出来るベース樹脂の発見と、改良方法の確立が本検討の材料面での到達課題である。



1-2. フィラーの選定によるコンパウンド・ペレット試作

■ 令和元年度の開発結果

昨年度には、下記のような開発を実施した。

- ① ブラスケム社保有のバイオポリエチレン（PE）各グレードより、FDM方式に適合可能なグレードを選定した（LDPE:SBC818）
- ② ①について、改質が必要な物性課題の割り出しを行った（収縮率・層間融着力・剛性）
- ③ ②の課題解決のため、バイオ由来に限って選定された複数種の改質フィラーとバイオPEの適切な配合案作成（セルロースファイバー、セルロースナノファイバー、木・紙粉など）
- ④ ③を実際にコンパウンドするための方式検討（コンパウンド法・京都プロセス法など）
- ⑤ ④によってコンパウンドされた材料での3Dプリント造形性評価（試験片での評価）を行い、椅子サイズの造形が可能と予想される材料・混練方法の選定

検討した配合内容と評価結果を下記表に示す。

	ベース樹脂検討		到達目標	京都プロセス法CNF			コンパウンド法 セルロースファイバー				
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ベース材料	SHA7260	SBC818	支給PP	支給LLDPE	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818
	HDPE	LDPE	PP	LLDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	非バイオ	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	-	-	GW	CNF / ナノ高	CNF / ナノ中	CNF / ナノ高	CF / 200 μm	CF / 400 μm	CF / 900 μm	針葉樹綿 / 1000 μm～	CF
	-	-	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
配合率	-	-	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
層間融着	260℃以上で○	180℃以上で○	○○	○	○	○	○	○	△	△	?
収縮抑制	××	×	○○	△	△	○	×	△	○○	△	?
結果・備考	200℃以上でバイオフィラーが劣化が起らない温度範囲で造形してしまうため、ベースレジンとして決定。		到達目標として評価。GW同等の収縮抑制効果を得られるバイオフィラーを見出すことが、本プロジェクトの鍵となる。	【京都プロセス法CNF】配合としては理想的だが、現時点ではCNFは開発品であるためコスト高であることが課題である。20000円/kg。ナノ度を低下させることで白色の材料を得られた。			【コンパウンド法】価格が安いメリット。凝集せずにコンパウンドすることが難しく、繊維長が長くなるほど、収縮抑制効果は出るが凝集が目立つ。現状、400 μm以上は性能・生産面で不安定。				

表 1-1. 令和元年度の材料開発結果（配合内容と評価）

1,2：ベース材料選定

3：到達目標確認のための「バイオ由来ではない」フィラーによる性能確認

4,5,6：京都プロセス法による CNF 配合検討

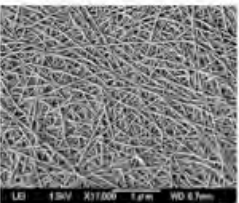
7,8,9,10：コンパウンド法による、セルロースファイバーの配合検討

昨年度の検討により、バイオ PE SBC818 を 3D プリント材料として改質するためには、下記を満足することが必要なことがわかった。

- ・セルロースナノファイバーは 20%程度配合で収縮抑制は達成できる。
- ・セルロースファイバーは 400 μm 以上の繊維長を持つものを適切に含浸・分散配合する。
- ・配合割合はフィラー種にもよるが、剛性と層間融着のバランスで 15~30%程度とする。

候補フィラーとして選定したセルロースファイバー、セルロースナノファイバーのバイオ PE SBC818 への配合に関しては、下記特徴があることが分かった。これらが本年度の課題である。

バイオPEを改質可能なフィラー候補

・セルロースナノファイバー 繊維径 数~数十 ナノメートル 繊維長 0.5~数μm  予想されるメリット 収縮抑制効果が高そう 予想されるデメリット 現状ではコストが最も高く、3年のプロジェクト期間内でコスト競争力のある製品開発が見込めるか。	・セルロースファイバー 繊維径 15-20 マイクロメートル 繊維長 15-900 マイクロメートル  予想されるメリット GF(ガラスファイバー)と同等の収縮抑制効果が期待できる。コストが安く、アスペクト比のコントロールが出来る 予想されるデメリット 収縮抑制効果が十分でない可能性(ガラスファイバーは十分な収縮抑制が出来ない)
--	--

セルロースファイバー	
特徴・課題	汎用の混練機で配合することが可能なため、量産コストを下げられる
	混練時の熱で、フィラーが褐色するが温度設定によって、着色防止が可能
	コンパウンドによって樹脂に配合を行うが、400 μm 以上の繊維長ではフィラーの嵩が大きく、混練機への導入不良・分散不良が生じる（令和 2 年度課題）
セルロースナノファイバー	
特徴・課題	京都プロセス法を用いて作成するため、現状ではコスト高であるが、汎用の混練機で配合することが可能なため、量産コスト低減は期待できる
	京都プロセス法 CNF は、配合混練時圧力でファイバーを解繊、分散させる技術であるため、せん断発熱等でフィラーが褐色する。白色化、低コスト化を試みると収縮抑制性能、剛性が下がる（令和 2 年度課題）

■本年度の検討内容

昨年度の報告ではフィラー候補としたセルロースファイバー、セルロースナノファイバー共に課題を抱えており、本年度ではそれらの解決を主な検討項目とした。また、随時フィラーに関する情報収集を行い、収縮率・層間融着力・剛性の両立がなされる新たなフィラー選定を並行して続けるなか、見出された 2 種のフィラー（紙パウダー、コンパウンドによる CNF）についても評価を行った。

それぞれの特徴と検討課題を下記表に記す。

セルロースナノファイバー(京都プロセス法 CNF)	
特徴・課題	量産を見据えた配合低コスト化検討
	褐色化・剛性のバランスのとれた配合設定検討

セルロースファイバー（CF）	
特徴・課題	汎用の混練機で、量産を見据えた方法での配合設定を行う
	分散不良を許容値以下に抑える製造条件を見出す

今期新たに下記 2 種・工法のフィラーの配合検討も行った

紙パウダー	
特徴・課題	古紙などから取り出したパルプ繊維フィラー。リサイクルフィラーであるため、環境負荷が低い。
	PP などをベース材として既に確立された技術であるため低コスト化が期待できる
	繊維長が短い（標準 $30\mu\text{m}$ ）ため、収縮抑制効果はこれまで検討しているフィラーに対して劣ることが予想される。

セルロースナノファイバー（コンパウンド法）	
特徴・課題	京都プロセス法と異なり、混練時のナノ解繊が不要であるため若干の低コスト化検討が可能と期待される。
	京都プロセス法同様、混練時の褐色化・剛性のバランスのとれた設定検討
	CNF の原料費によるコスト上昇（課題）

本年度に検討したバイオポリエチレン・コンパウンドの配合内容一覧を下記に示す。

	ベース樹脂検討		到達目標	コンパウンド法	京都プロセス法CNF				コンパウンド法セルロースファイバー		紙パウダー
No.	1	2	3	11	12	13	14	15	16	17	18
ベース材料	SHA7260	SBC818	支給PP	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818
	HDPE	LDPE	PP	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	非バイオ	バイオ	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	-	-	GW	CF / 900 μ m	CNF / ナノ低	CNF / ナノ低	CNF / ナノ中	CNF / ナノ低	CF / 400 μ m	CF / 900 μ m	紙パルプ 30 μ m
	-	-	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
配合率	-	-	20%	40% - 20%	15%	20%	15%	16.3%	30%	30%	26.5%
層間融着	260℃以上で○ 180℃以上で○		○○	□	△	△	□	□	○	△	□
収縮抑制	× ×	×	○○	○○	○	○	○○	○	○	○	△
特徴・狙い			ナノダックスの特殊技術にて綿状のGWを混練	ナノダックス設備での高レベルコンパウンドを実施	白色狙い + 引張伸び重視	白色狙い + 強度重視	引張伸びをさらに重視 + 褐色を許容	引張伸び重視 + 実機想定での白色狙い	コンパウンド法での混練向上狙い + 量産性向上	コンパウンド法での混練向上狙い + 量産性向上	白色度 + 量産性向上 + 低コスト
結果	使用不可能	ベースレジンとして決定。	到達目標として評価。	収縮抑制効果大 + コスト高 ↓ 椅子造形	また脆く、さらに引張伸び向上を検討→14へ	靱性がなく、伸び向上を使用不可	褐色度高いが、強度・3D造形性ともに良好 ↓ 椅子造形予定	収縮低減効果・強度共に不足	量産機での試作分散ギリギリ良好と判断 ↓ 椅子造形	混練不足により再検討必要	椅子造形ギリギリレベルの収縮抑制効果と判断。分散性は良 ↓ 椅子造形

	ベース樹脂検討		到達目標	コンパウンド法セルロースファイバー					コンパウンド法CNF	紙パウダー
No.	1	2	3	19	20	21	22	23	24	25
ベース材料	SHA7260	SBC818	支給PP	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818
	HDPE	LDPE	PP	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	-	-	GW	CF / 400 μ m	CF / 300 μ m	CF / 400 μ m	CF / 300 μ m	CF / 400 μ m CF / 300 μ m =1:1	CNF	紙パルプ 100 μ m
	-	-	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
配合率	-	-	20%	30%	30%	30%	30%	30%	6%/15%	30%
層間融着	260℃以上で○ 180℃以上で○		○○	△	△	○	○	○	□	△
収縮抑制	× ×	×	○○	△	△	○	△	△	6% : △ 15% : ○○	△
特徴・狙い			ナノダックスの特殊技術にて綿状のGWを混練	コンパウンド法での混練向上狙い + 加圧ニーダーによる、製造条件調整	コンパウンド法での混練向上狙い + 加圧ニーダーによる、製造条件調整	コンパウンド法での混練向上狙い + 二軸押出による、製造条件調整	コンパウンド法での混練向上狙い + 二軸押出による、製造条件調整	コンパウンド法での混練向上狙い + 二軸押出による、製造条件調整	コンパウンド法によるCNFの混練検証。コンパウンド法なので京都プロセスに対し低コスト化を期待	白色度 + 量産性向上 + 低コスト + 繊維長を長くして、収縮抑制効果向上
結果	使用不可能	ベースレジンとして決定。	到達目標として評価。	均一分散性不足により再検討必要	均一分散性不足により再検討必要	コンパウンド法検討の中では、現時点で最も良好な均一分散が実現している。	フィラーの劣化（検証中）により、表面の荒れが発生 → 300 μ mの繊維の劣化と推定	フィラーの劣化（検証中）により、表面の荒れが発生 → 300 μ mの繊維の劣化と推定	15%で椅子造形可能レベルと判断。ただし、CNF自体の劣化により、依然高コストに課題がある。	繊維長100 μ mでは短縮が発生。均一分散は出ていないものの、毛羽立ちなどは無く収縮抑制効果も高いため、椅子造形に進んだ。

表 1-2. 令和 2 年度の材料開発結果（配合内容と評価）

12,13,14,15,24 : 京都プロセス法・コンパウンド法による CNF 配合検討

16,17,19,20,21,22,23 : コンパウンド法によるセルロースファイバーの配合検討

18,25 : コンパウンドによる紙パウダーの配合検討

1-3. 3D プリント造形性評価

検討① セルロースナノファイバー(京都プロセス法)

層間融着性と靱性の向上と白色度とのトレードオフが課題である。

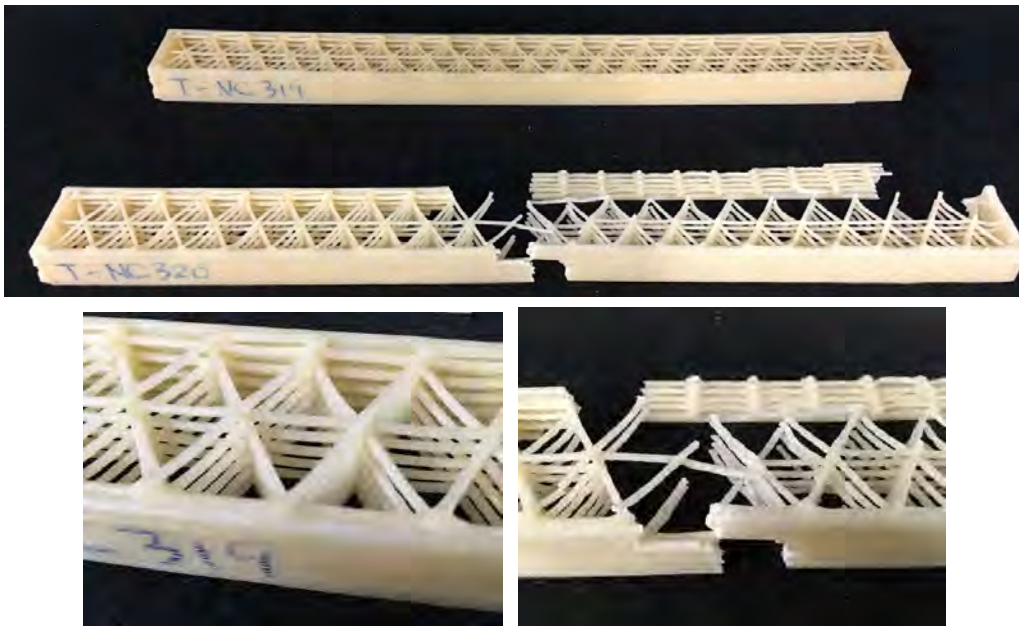


図 1-1. No.12. 変性セルロース 15%(左) No.13. 変性セルロース 20%(右)

白色度を高めた混練設定において、分散不良（写真左）や、靱性の低下による脆化(写真右)が起きた。

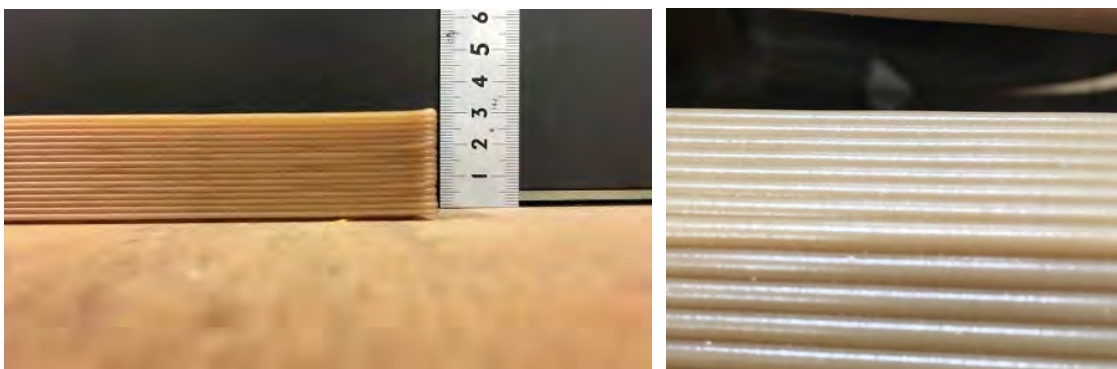


図 1-2. No.14. 変性セルロース 15%

多少、褐色化を許容し、靱性・剛性を重視した配合。均一分散性が非常によく、造形時の表面も安定している（図 1-2 右）。



図 1-3. 着色評価

カラーマスターバッチのブレンドによる簡易着色評価を行ったところ、均一に着色することが出来た（図 1-3 下：緑色に着色）。元の樹脂の褐色により、多少くすんだ色味になる。白色度とのトレードオフ、層間融着性と靱性の向上を課題としていたが、No.14 配合が最もよい結果となった。



図 1-4. No.15. 変性セルロース 16.3%

No.14 に褐色化を抑えた配合を試したが（No.15）、収縮が大きく出たため(図 1-4)、No.14 で椅子製造実験を行うことにした。

検討② セルロースファイバー・コンパウンド(ナノダックス法)

高混練が可能な方法にて、嵩高く混練の難しい、 $900\mu\text{m}$ のセルロースファイバーをコンパウンドした。熱と圧力をかけるため、褐色化は免れないが、分散がうまくいっているようで、収縮抑制効果は高い。椅子製造を行ったところ強度試験にて合格した。繊維が吸湿すると発泡し、造形結果に大きな影響を及ぼすが、熱風乾燥器などで乾燥をかけることで、使用可能状態に回復することが分かった。



図 1-5. No.11. セルロースファイバー (CF) $400\mu\text{m}$ 40% 吸湿状態(下)
No.11. CF $900\mu\text{m}$ 40%+乾燥処理(上)



図 1-6. 吸湿状態のペレットで造形すると、発泡などにより収縮が非常に大きくでる

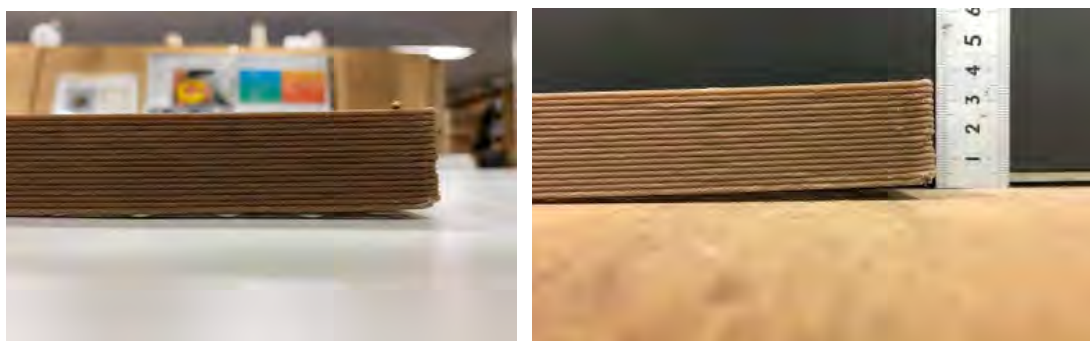


図 1-7. No.11. CF $400\mu\text{m}$ 40% (左) を 30%に希釈(右)

収縮抑制効果は 30%程度の配合で十分であることがわかった。

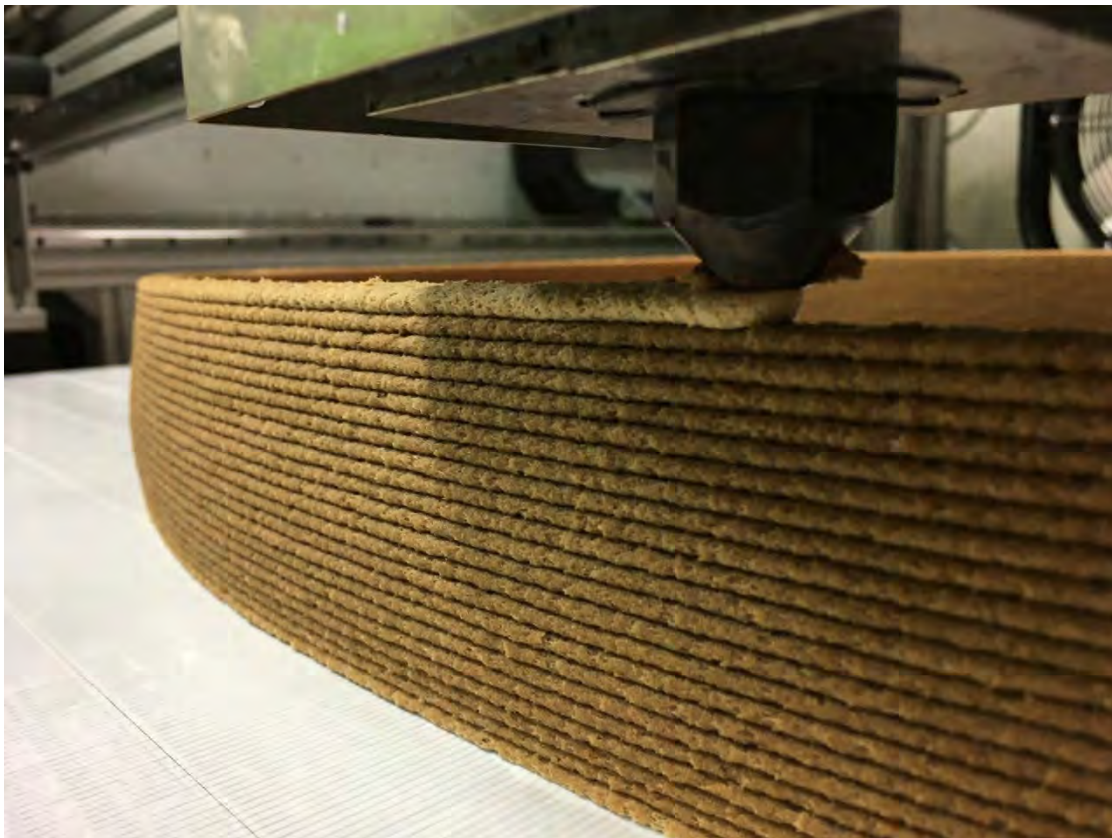


図 1-8. No.11. CF400 μ m30%による 3D プリント椅子製造中写真

家具製造専門家により、表面の毛羽立ちは許容可能との評価で、製造された椅子は強度評価を行い、3脚のうち2脚は合格した。

検討③ セルロースファイバー・コンパウンド(加圧ニーダー加工、二軸押し出し法)

一般的な設備にて混練を行うため、量産時のコスト低減が可能となる方式。昨年度からの検討からの課題として、均一分散化に課題があり、造形時の表面の毛羽立ちが発生する。

毛羽立ちは、インテリア製品としての適用の場合、製品性(座る人を傷つけない)の観点から、改善が必須であり、二軸混練機による二度練りや、加圧ニーダーと二軸混練機を組み合わせた混練などを試しているが解決に至っていない。これまでの検討では、No.21 が、収縮抑制・均一分散の観点から最も良好ではある。



図 1-9. No. 16. CF400 μ m30%(左) No. 17. CF 900 μ m30%(右) 押出機



図 1-10. No.19. CF400 μ m30%(左) No. 20. CF 300 μ m30%(右) ニーダー加工



図 1-11. No.21. CF400 μ m30%ニーダー+押出機加工



図 1-12. No.22. CF300 μ m30%(左) No. 23. 300+400 μ m30%(右) ニーダー+押出機加工

400 マイクロメートル以上の繊維長を十分に含浸混練できれば、十分な収縮抑制と層間の融着を達成できる見込みとして混練機械・混練条件を検討しながら試作を続けている。

検討④ 紙パウダー・コンパウンド

古紙などから取り出したパルプ繊維フィラーで、リサイクルフィラーであるため、環境負荷が低い。既に PP ベース・3D プリント以外の用途にて製造実績がある。低コスト製法側からの検討では「紙パウダー」配合が、低コスト・均一分散性を両立している。

他方、3D プリント向けに調整されたフィラーではないため、収縮抑制・剛性は不足がある。



図 1-13. No.18. 紙パウダー（粒径 $30\mu\text{m}$ ） 26.5%

収縮抑制効果は、CNF,CFに比べ低く、造形可能なサイズに制限が設けられる可能性がある。

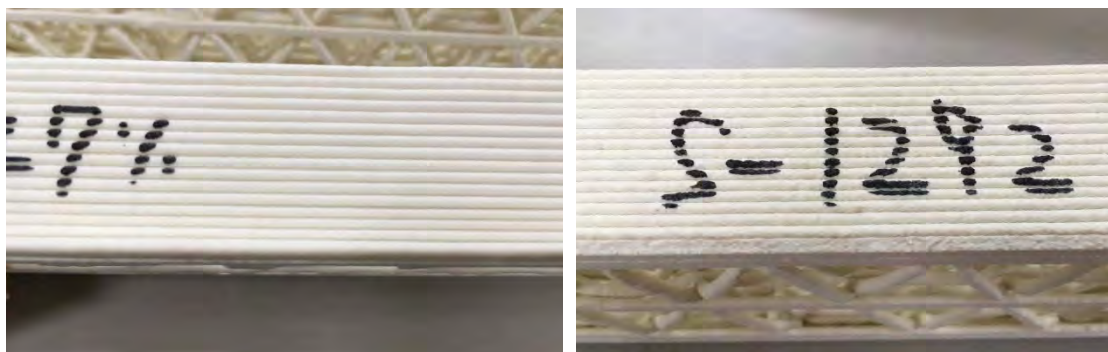


図 1-14. No.18. 紙パウダー（粒径 $30\mu\text{m}$ ）（左） No.26.（粒径 $100\mu\text{m}$ 品） 30%（右）

フィラーの均一分散は良好で、毛羽立ちは見られない。粒径の大きい（ $100\mu\text{m}$ ）サンプルでは、若干の表面荒れがみられる。

検討⑤ セルロースナノファイバー・コンパウンド(後混練方法)

京都プロセス法以外の方法で、PP に CNF をコンパウンド出来る製法を利用し、CNF を製造後にバイオ PE にコンパウンドする手法を検討した。バイオ PE ベースでも、CNF の均一なコンパウンドは可能であった。後工程での混練であるが、温度設定等をコントロールすることで、褐色化を低減しながらの混練が可能であった。既に実績のある PP においては、6%程度の CNF 濃度で十分な収縮抑制効果が期待できるとのことであったが、今回選定のバイオ PE,SBC818 では、6%では収縮が大きく、15%配合で収縮抑制ができた。ただし、この場合でも原料となる CNF のコスト面から、混練による材料コストは高額となる見通しである。CNF の価格が十分に下がれば、コンパウンドによる配合が出来ることは、コストメリット・生産性向上など利点につながる。

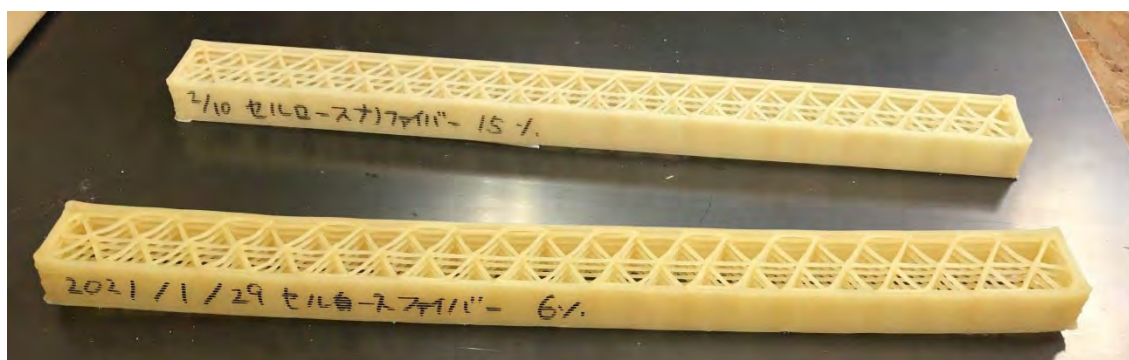


図 1-15. No.24. 後混練法 CNF15%(上) CNF6%(下)

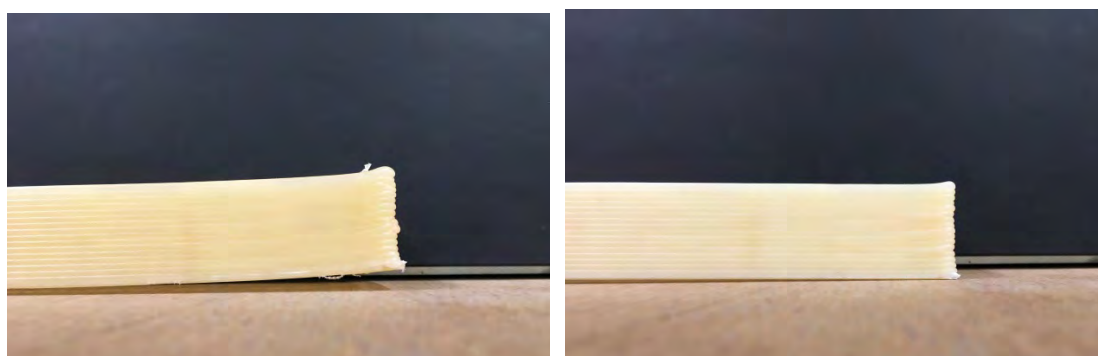


図 1-16. No.24. 後混練法 CNF6%(左) CNF15%(右)

PP での実績がある 6%配合では収縮が大きく出ている。今回のバイオ PE ベースにおいては 15%程度の配合が求められる。

1-4. バイオポリエチレン・コンパウンドの耐候性試験

ベース樹脂であるSBC818と、椅子造形評価が可能と判断された3種の配合(材料No. 1,14,18,21)に、耐候剤を配合し、耐候性試験を実施する。7年相当の促進試験(1260時間)により、屋外家具としての使用適性を判断する。バイオPEの製造工程では、サトウキビなどバイオマス素材からエチレンを生成した後の行程は、通常の石化PEと同じであるため、基本的には化学的性質は変わらないと言われている。本報告の段階では7年相当の促進試験(1260時間)が終了しないため、途中結果(1年相当)を報告する。

耐候性能について～試験の方向性・計画している内容について

PE固有の吸光ピークは、300nm-340nm、そこを多くカットするための耐候剤の添加を検討。BASF社製【Tinuvin 479】とHALSの併用が適していると考えられる。

■検討添加剤

UVA 紫外線吸収剤: Tinuvin 479 0.1~0.5%/TTL

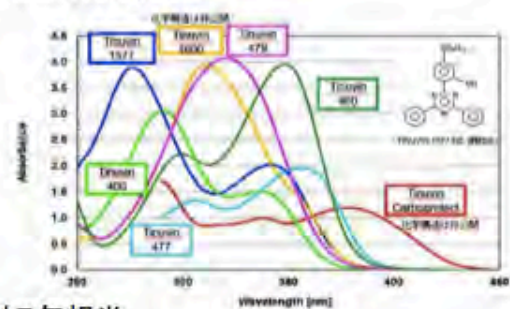
HALS 光安定剤: Tinuvin XT850 0.1~0.5%/TTL

■着色料

無機系着色剤 更に光を反射する効果を期待

■長時間暴露試験

スーパーキセノンウェザーメーター 1,260時間 屋外7年相当



※耐候剤メーカー(BASF)より、バイオPEと石化PEは同様の対抗剤が有効とのことから上記耐候剤を選定

※CNFなどバイオフィラーに、リグニンのような酸性物質が含まれる場合、通常のN-H型、N-アルキル型ではHALSが失活してしまう懸念がある、今回選定のHALSは耐酸性を有するNOR型のHALSを含むため失活懸念も低くなると予想する。

※バイオ由来フィラーの劣化を考慮した耐水試験の要否は検討中

■ 初期物性値

耐候試験前の初期物性値を表 1-3 に示す。耐候剤 Tinuvin479(BASF 製) 0.3%添加では、物性への影響はほぼ見られない。

初期物性値

				1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2
				バイオPP	バイオPP	バイオPP	バイオPP	バイオPP	バイオPP	バイオPP	バイオPP
						CNF 15%	CNF 15%	CMF 20%	CMF 20%	紙/パウダー 26.5%	紙/パウダー 26.5%
					Tinuvin 479 0.3%		Tinuvin 479 0.3%		Tinuvin 479 0.3%		Tinuvin 479 0.3%
試験項目	試験条件	単位	試験方法								
比重	23℃	—	ISO1183	0.92	0.92	0.98	0.98	0.98	0.99	1.04	1.05
MFR	190℃, 2.16kg	g/10min	ISO1133	8	—	4	—	—	—	—	—
引張強度	23℃	MPa	ISO527	9.7	9.7	14.0	14.5	10.5	9.7	8.3	8.1
引張破断点伸び	23℃	%	ISO527	84.0	82.4	13.9	15.0	23.1	23.6	49.0	44.5
曲げ強度	23℃	MPa	ISO178	6.9	6.7	16.4	16.3	12.5	12.8	11.7	11.8
曲げ弾性率	23℃	MPa	ISO178	120	121	649	653	342	345	398	410
シャルピー(ノック付)	23℃	kJ/m2	ISO179	58.750(NB)	59.785(NB)	4.653(NB??)	4.613(NB??)	11.207(NB??)	10.360(NB??)	15.109(NB)	12.868(NB)
HDT	0.45MPa	℃	ISO75	52	54	65	64	67	63	63	62

表 1-3 耐候試験前の初期物性値

試験番号 1-1、1-2(材料 No,1), 試験番号 2-1、2-2(材料 No,14)

試験番号 3-1、3-2(材料 No,18), 試験番号 4-1、4-2(材料 No,21)

■ 耐候性試験結果

スーパーキセノンウェザーメーターによる 472 時間(屋外暴露 1 年間相当)の試験後の性能を表 1-4 に示す。すべてのサンプルに共通して耐候剤 Tinuvin479 (BASF 社製)を 0.3%配合して効果の比較を行った。破断伸び保持率で比較すると、バイオ PE 単体の 1-1 は、耐候剤無添加にも関わらず 90%以上の伸び率を保持しているのに対し、フィラー添加したサンプルは耐候剤無添加では 56.5-61.5%と、保持率が大きく低下している。耐候剤の添加により、フィラー添加サンプルの伸び率も 65.4-79.5%程度まで向上しているため、耐候剤の効果が確認できた。また、本評価よりフィラー種類によっても性能の保持率が異なることが明らかになった。

耐候性試験結果

	1-1 バイオPP				1-2 バイオPP				2-1 バイオPP/CNF 15%				2-2 バイオPP/CNF 15%			
	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)
0h	9.7	—	84.0	—	9.7	—	82.4	—	14.0	—	13.9	—	14.5	—	15.8	—
472h	9.6	98.5	79.4	94.5	9.7	100.0	80.9	98.2	15.5	100.0	8.3	59.5	15.2	100.0	12.6	79.5
944h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
1416h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
2360h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
3304h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
4720h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0

	3-1 バイオPP/CMF 20%				3-2 バイオPP/CMF 20%				4-1 バイオPP/紙/パウダー 26.5%				4-2 バイオPP/紙/パウダー 26.5%			
	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)	引張強度 @降伏点 (Mpa)	引張強度 保持率 (%)	破断伸び (%)	破断伸び 保持率 (%)
0h	10.5	—	23.1	—	9.7	—	23.6	—	8.3	—	49.0	—	8.1	—	44.5	—
472h	11.8	100.0	13.0	56.5	11.6	100.0	15.4	65.4	8.2	99.9	30.1	61.5	8.4	100.0	33.1	74.5
944h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
1416h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
2360h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
3304h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
4720h		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0

表 1-4 耐候性試験(スーパーキセノンウェザーメーター472 時間)後の性能

試験番号 1-1、1-2(材料 No,1), 試験番号 2-1、2-2(材料 No,14)

試験番号 3-1、3-2(材料 No,18), 試験番号 4-1、4-2(材料 No,21)

耐候性試験前後のサンプル比較写真を図 1-17 に示す。

Figure 1 consists of two side-by-side photographs of a juvenile male blue tang's dorsal fin. The left photograph is labeled '0h' and shows the dorsal fin with a dark brown color. The right photograph is labeled '472hrs' and shows the dorsal fin with a lighter, yellowish-brown color. The dorsal fin is divided into four sections, labeled 1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 4-1, and 4-2. The color change is most pronounced in the middle sections (2-1, 2-2, 3-1, 3-2), which appear significantly lighter in the 472hrs panel compared to the 0h panel. The sections 1-1, 1-2, 4-1, and 4-2 show less pronounced changes, appearing more yellowish in the 472hrs panel. A small yellow tag with the number '1' is visible in the bottom right corner of both panels.

試験番号 1-1、1-2(材料 No,1), 試験番号 2-1、2-2 (材料 No,14)
試験番号 3-1、3-2 (材料 No,18), 試験番号 4-1、4-2 (材料 No,21)

今回は 472 時間(1年相当)の途中経過での報告となったが、バイオ PE にも石化 PE 同様の耐候剤の添加で効果が確認できた。バイオ PE 単体に比べてセルロースファイバーなどを配合したサンプルの耐候劣化が大きいことが分かった。また、フィラー種によっても耐候性に差があり、最適なフィラー選定の評価軸の一つとなり得ることが検証された。

1-5. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットの技術開発の課題

今年度は、昨年までの CNF、セルロースファイバーの残存課題解決に向けて検討重ねた。また、新たに紙パウダーの配合による、低収縮化を行った。検討の結果、3 種のフィラー配合それぞれに椅子サイズの大型 3D プリントが可能となる配合を見出すことが出来た。(材料 No.14,18,21)。しかし、コストと性能のトレードオフにより、1 種のフィラー配合で製品化まで進める樹脂は未だ確立できていない。各配合の特徴を下記に示す。

・ CNF（京都プロセス法 p.8～9・コンパウンド法 p.15）

収縮抑制・剛性といった性能面では京都プロセス法を用いた CNF 配合が最も優れているが、コストの高さがネックとなっている。コンパウンド法での CNF 混練でも、均一分散・収縮抑制効果は確認できたが、強度評価・椅子サイズでの造形までは進んでいない。現時点では CNF 自体に由来するコスト高が課題であり、本検討内容・期間の範囲での解決は難しい。

・セルロースファイバー p.10～13

収縮抑制・剛性は合格レベルであるものの CNF には劣るレベルである。コンパウンド法により CNF より低コストで実用化できることが期待されるが、繊維の分散不足により 3D プリント造形物表面における「毛羽立ち」が発生しており、製品としての使用が難しいという評価である。本年度の検討内では「毛羽立ち」の起きない最適な配合方法（工法・配合条件）確立なされていない。

・紙パウダー p.14

低コスト製法側からの検討では「紙パウダー」配合が、低コスト・均一分散性を両立しているが、収縮抑制・剛性は不足がある。

・ブレンド法（次年度以降の課題）

今年度までの検討内容では、各配合のコストと性能のトレードオフにより、1 種のフィラー配合（フィラー種類・コンパウンド方法）で製品化まで進める材料は未だ確立できていない。CNF は収縮抑制効果が非常に高く、性能面では最も有望な材料である。CNF 用いる場合のコスト低減対策については、CNF 自体が実用アプリケーション探索段階ということもあり、未だ市場が小さく、製造規模の拡大によるコスト低減が難しい状態である。

今後、社会情勢の変化の結果 CNF の需要が増えることで、効率的な製造を行うことが出来る設備が現れ、製造コストが大幅に低減される可能性が期待されるものの、本研究期間内で

は低コスト化された CNF 配合材料は入手不可能である。

このような状況の中、実用化に向け性能とコストの両立を目指せる現実的な選択肢として複数のコンパウンド材料の「ブレンド法」が考えられる。ベースとして最も安価となる紙パウダー配合（収縮抑制効果に課題）を選定し、不足している収縮抑制効果を補助する形で、CNF 配合（コスト高に課題）や CF 配合（均一分散に課題）をブレンドすることで、最適値を見出していくことが十分に可能と期待される。配合の割合、ブレンド方法などブレンド法の開発を次年度以降の検討課題とする。



また、1年相当の試験だがバイオ PE にも石化 PE 同様の耐候剤の添加で効果があり、バイオ PE 単体に比べてセルロースファイバーなどを配合したサンプルの耐候劣化が大きく、フィラー種によっても耐候性に差があることが認められた。フィラー選定と添加剤による耐候性改質の検討は今後の課題である。

2. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験

2-1. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験の目的

昨年度実証した適切な吐出幅(ノズル径 8mm)と生産スピード(椅子一脚 12kg の製造 8 時間)の製造条件に続いて、金型成型による従来製品と比較して優位性のある椅子の設計と大型 3D プリントによる製造実験を 20 脚程度行い、耐久性試験による実用性評価検証を行う。

2-2. 大型 3D プリンタの成型方式

本実証実験では、バイオポリエチレン・コンパウンドの開発評価の結果 3D プリントに適合すると判断された材料について、3D プリンタ(図 2-1)による成型方式に適合する椅子形状の設計を行い、製造と検証を行った。



図 2-1. 設計・製作 エス. ラボ株式会社

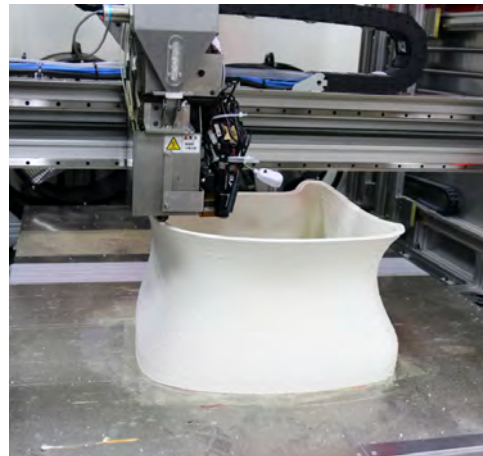


図 2-2. 椅子のプリンティング

大型 3D プリンタによる成型(造形)方式の特徴は、次のようにまとめられる。

- ・ 成型範囲: 1メートル四方
- ・ 成型方法: 溶融された樹脂を連続的に積層させることにより成型する
- ・ 成型物の厚さ: 材料溶融押しノズルが周回・積層しながら造形出力する。周回1周するものを1層、1周後に内側にもう一周し合計2周するものを2層と呼ぶ
- ・ 実寸椅子の代表的な成型時間: 1層の成型で約4時間／2層で約8時間
- ・ 椅子を横に寝かせる方向で積層造形する(図2-2)
- ・ 直径8mmの押しノズルにより8ミリ幅の厚みの成型とし、一層(レイヤー)の高さが3ミリで積層するようにノズル移動速度を調整する(図2-3)。
- ・ 可能な積層角度: 角度45度以上の積層(図2-4)でないと、積層した樹脂が自重で崩れることになり(オーバーハング)、成型不良を起こす。
- ・ 形状特性: 成型時間の短縮と樹脂材料を切れ目なく吐出する為、ノズルが一筆書きで移動造形(プリント)できる形状にしなければならない。

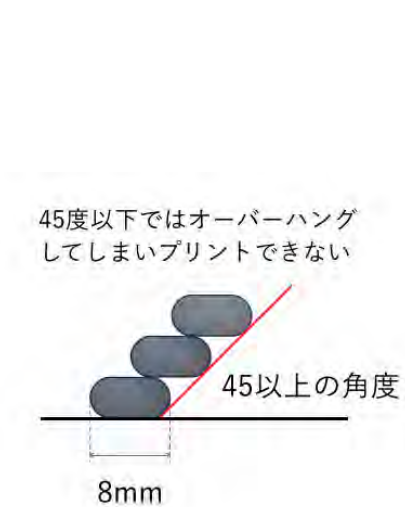


図2-3

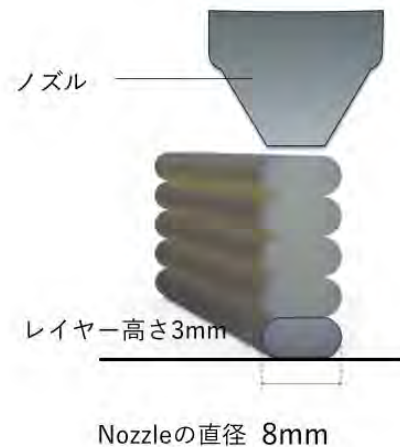


図2-4

2-3. 3D プリント製造椅子の評価検証方法

製造された3Dプリント椅子を下記4項目により検証を行った。

(1) 材料の反り

材料の3Dプリント適合性評価段階で2mm径のノズルを使用した試験片の結果から、椅子サイズにスケールアップしバイオPEコンパウンドを出力した時の反りの有無を確認した。材料の反りが強い場合は椅子形状に影響してしまい、形の再現性が担保出来なくなる。

バイオPE材を追加するなど、フィラーの配合量を変えることにより、反りが改善できる場合がある。

(2) 強度

株式会社オカムラの協力により同社の標準的な強度試験を実施した。

- **落下衝撃試験：米国の試験規格**
重さ102キロと136キロの重さの砂袋を高さ15cmの高さから落下させ強度をみる。
- **製品衝撃試験：オカムラ社試験規格**
高さ45cmのところから10回自由落下させる。
- **座面静的試験：JIS規格**
1300N で10秒間座面の押し付けを 10 回行う。

これらに加えて、1層、2層厚で椅子の強度が変化する為、実際に着座時に身体の重量に対する強度が担保できているか(座り心地、硬さ、柔らかさ)の検証と調整を行った。

(3) 色

材料の色の発色、濃さ／薄さにより、着色による耐候性改質の可能性の観点から検証した。

(4) 表面テクスチャー

バイオPEコンパウンド材料よりザラつきのある表面から、光沢のあるツルツルした表面まで、様々なテクスチャーが見られ、椅子の機能の観点から検証した。

2-4. 椅子形状の 3D プリント実証実験結果

椅子形状の3Dプリント製造（製造番号BPC-01～20）の実証結果を以下に示す。

BPC-01

材料No.17: セルロースファイバー400 μ m 40%

（プリント: 8mm1層、反りの抑制: ○、色: 茶褐色、表面: ザラつく）

1層での出力で椅子の強度がどれだけ担保できるかを検証した。座ると身体の重さで必要以上に椅子の形が凹んでしまい破断する可能性があった。落下衝撃試験で破損し不合格だった（資料2-2）。木粉がフィラーに使用されている為、木の茶色の粉末が表面に現れ独特の素材感を持つ。



BPC-02

材料No.17: セルロースファイバー400 μ m 20%に調整

（プリント: 8mm2層、反りの抑制: X、色: 茶褐色、表面: 光を反射する艶あり）

造形面では、BPD-01での1層の出力から2層の厚みへ変更して出力を試みた。材料面ではセルロースファイバー20%の配合での反り抑制の検証を行った。結果、2層にして造形することで、椅子への着座に対して十分な強度が担保できた。材料面では、セルロースファイバー20%では反りへの抑制が弱く成形に適していないことが分かった。強度試験を行ったところ合格した（資料2-1）。



BPC-03

材料No.17: セルロースファイバー400 μ m 30%に調整

(プリント:8mm2層、反りの抑制:○、色:茶褐色、表面:ツヤ無し)

セルロースファイバー20%から30%へ配合を上げて、反り抑制の検証を行った。

結果、反りを十分に抑制できた。強度試験を行ったところ合格した(資料2-1)。



BPC-04

材料No.17: セルロースファイバー400 μ m 30%に調整

(プリント:8mm2層、反りの抑制:○、色:茶褐色、表面:ツヤ無し)

今迄の背もたれの無い椅子の設計から、背もたれ有りの椅子に展開し製造実証を行った。着座時に背もたれに重心を乗せても椅子の形状に歪みが現れずに十分な強度が担保できた。



BPC-05

材料No.16 : セルロースファイバー400 μ m,30%

(プリント:8mm2層、反りの抑制:○、色:クリーム、表面:マット、ザラザラ)

着座時には、以前の茶褐色のものと比べると柔らかく、素材の硬さ柔らかさで、着座による構造の歪みから生じるクッション性が変化することが分かった。



BPC-06

材料No.15 : 変成セルロース 15%

(プリント:8mm 2層、反りの抑制:◎、色:茶色、表面:強い光沢／ツルツル)

他の材料と比べ、設計された形状の再現性が一番高い。出力時の表面のざらつきやムラもなく最もディテールが表現されている。



BPC-07

材料No.15 :変成セルローズ 15%

(プリント:8mm 1層、反りの抑制:◎、色:茶色、表面:強い光沢／ツルツル)

2層の厚さでの出力が硬かった為、今回は1層での構造的な強度の担保に期待し出力検証を行った。結果、柔らかく椅子として強度が十分に担保できなかった。



BPC-08

材料No.15 :変成セルローズ 15%

(プリント:8mm 2層、反りの抑制:◎、色:茶色、表面:強い光沢／ツルツル)

椅子の後部の曲面を内側に曲げることで、椅子の構造の強度が出るか検証した。以前の椅子の後部を外側に曲げたモデルと同様、座ることの可能な十分な強度のある椅子ができた。



BPC-09

材料No.18 :紙パウダー 26.5%

(プリント:8mm 2層、反りの抑制:△、色:白色、表面:ザラつきあり)

紙のパウダーをバイオPEにコンパウンドしてある材料を使い椅子を出力した。硬い材質で、多少反りが発生した。色がとても白く、後に顔料ペレットを加え着色しやすい材料である。強度試験をおこなったところ、落下衝撃試験で割れが発生し不合格だった(資料2-1)。



BPC-10

材料No.18 :紙パウダー 30% に調整

(プリント:5mm 2層、反りの抑制:△、色:白色、表面:ザラつきあり)

椅子モデルを使用し実際に何ミリ厚まで薄くすることで、椅子の強度を担保できるかを検証した。この出力では5mmノズルを使い2層(厚み10.67mm)で出力。結果、出力した椅子に着座しテストしたところ、身体の重みにより椅子の形状に歪みが発生し変形した。



BPC-11

材料No.18 :紙パウダー 30% に調整

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:△、色:白色、表面:ザラつきあり)

BPC-10より強度をだすために、5mmから6mmノズルに取り替え、2層(厚み12.6mm)で出力した。着座しテストにより身体の重みによる椅子の形状の変形が生じなかった。この厚さとすれば構造的に十分な強度があると判断され、10mm～12mm径のノズルを用意し、1層で出力する製造方法が望ましいことがわかった。落下衝撃試験では、割れが発生し不合格だった(資料2-1)。



BPC-12

材料No.16 :セルロースファイバー900 μ m 30% 2度練り

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:○、色:クリーム色、表面:ザラつき、毛羽立ちあり)

1回の混練では、フィラーの分散が不足したので2度混練を行った材料を出力。椅子の硬さは良いが、表面のテクスチャーが粗く、毛羽立っているのが問題である。



BPC-13

材料No.18 :紙パウダー 30% に調整

(プリント:6mm 1層、反りの抑制:△、色:白色、表面:ザラつきあり)

ハイスツール形状椅子の実証実験を行った。形状と強度の関わりを吟味した。



BPC-14

材料No.21 :セルロースファイバー400 μ m 30%

(プリント:6mm 1層、反りの抑制:○、色:クリーム色、表面:ややザラつきあり)

BPC-12 でも問題としていた表面の毛羽立ちを改善するため、6mm のノズルを使いながら吐出量を増やしてノズル内に圧力を加えることにより約8mm の幅になるようにして出力した。その結果、テクスチャーが改善されることが分かった。



BPC-15

材料No.21 : セルロースファイバー400 μ m 30%

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:○、色:クリーム色、表面:ややザラつきあり)

ハイスツールの別の形状を実験した。表面の毛羽立ち問題の解決策として一度ペレット材料を乾燥させ、水分を取った状態にしてからBPC-14と同じパラメータで出力を試みた。結果、若干毛羽立つがザラつきが改善された。



BPC-16

材料No.22 : セルロースファイバー300 μ m 30%

(プリント:6mm 1層、反りの抑制:○、色:クリーム色、表面:ややザラつきあり)

これらセルロースファイバーの長さ300 μ m、400 μ m、900 μ mのコンパウンドでの製造実験では、反りの抑制に関してはどれもよいが、300 μ mと400 μ mは明らかに表面の毛羽立ちがなくなっているのが確認された。300 μ mの方が若干白色に近い。



BPC-17

材料No.25 :紙パウダー(粒径大) 30%

(プリント:6mm 1層、反りの抑制:○、色:白色、表面:ザラつきあり)

スツール形状の製造実験を行った。まず1層で出力して強度を検証した。

この材料は、ドライミックス調整により30%にした材料No.18よりも、反りの抑制が効いている。



BPC-18

材料No.18 :紙パウダー 30% に調整

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:○、色:白色、表面:ザラつきあり)

BPC-17での検証したスツールの強度が不十分だった為、2層出力の検証を行った。強度が担保されたものが製造できた。



BPC-19

材料No.18 :紙パウダー 30% に調整

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:○、色:白色、表面:ザラつきあり)

BPC-17を拡張した大型のスツール形状の実証実験を行った。



BPC-20

材料No.14 :変成セルローズ 15%

(プリント:6mm 2層、反りの抑制:◎、色:茶色、表面:強い光沢／ツルツル)

ロースツール形状の製造実験を行った。



2-5. 再生ペレットによる 3D プリント製造実験

材料 No.18:紙パウダー30%で製造した BPC-10、BPC-13 を粉砕し、再度ペレット加工した材料により(リサイクル率100%)、BPC-18 と同じモデルの 3D プリント製造実験を行った。全体形状は造形できたが、若干反りの抑制が弱いところが見られた。物性評価によるさらなる検証が必要である。



材料No.18 :紙パウダー 30% 3Dプリント製造後粉砕100%再生ペレット
(プリント:6mm 2層、反りの抑制:△、色:白色、表面:ザラつきあり)

2-6. 着色剤の検討

3D プリント製造家具の屋外利用のため紫外線劣化防止に効果的な着色剤を加えた場合の造形実証実験を行った。

材料 No.18 :紙パウダー53%配合のコンパウンドを30%に希釈して調色した着色用マスターバッチ(以降 M B)10%を、材料 No.25 :紙パウダー(粒径大) 30%のバイオポリエチレン・コンパウンドに混ぜ(図 2-5)、3D プリンタへ材料を投入し着色造形出力サンプルを作製した(図 2-6)。

サンプル製造の結果では、質感がボソボソの粉状になり、粘性が高く、若干色が混ざりきれていない状況が確認できた。紛状となる現象では、層間の接着力低下が懸念されるので、バイオポリエチレンの配合量を追加して実験を行ったところ、粉状の状態がやや改善できた。材料の粘性が低くなり、顔料がより浸透したものと思われる。

紙パウダー30%配合とする場合の着色では、30%でコンパウンドされたペレットに顔料 M B を加えるより、紙パウダー40%でコンパウンドされたものにドライミックスでバイオポリエチレンを添加し30%に希釈してから顔料 M B を加える方が、色の浸透と表面テクスチャーや粘性が改善されることが考えられる。



図 2-5. 着色用マスターバッチ



図 2-6. 3D プリント着色サンプル

2-7. 個別カスタマイズの検討

ユーザーの身体に沿った、椅子の「座り心地」や「お尻のフィット感」などのカスタマイズを可能にするパラメトリックデザインの実装を行った(図2-7)。椅子の座面と底面の形状を変化させずに椅子の高さ(図2-8)、及びお尻の幅のサイズの調節(図2-9)、背もたれ有無の選択を行う可変モデルを作製した。

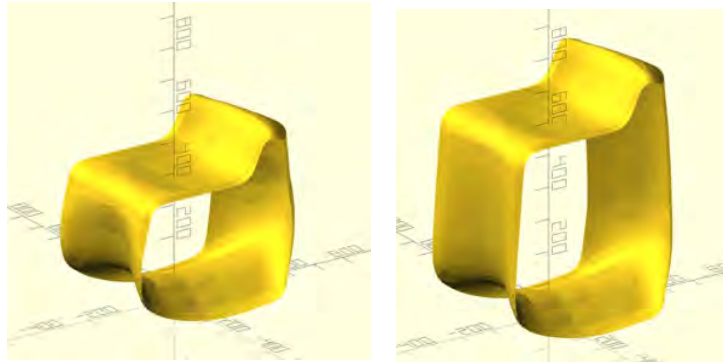


図 2-7. パラメトリックモデルによるカスタマイゼーション

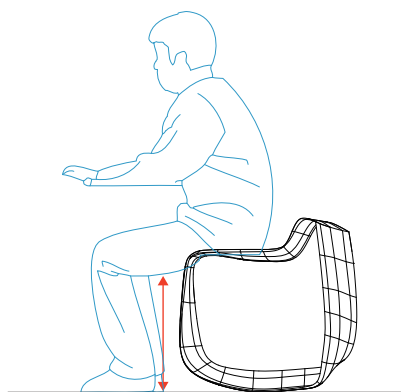


図2-8. この高さをユーザーの足に合わせることで座り心地に左右する

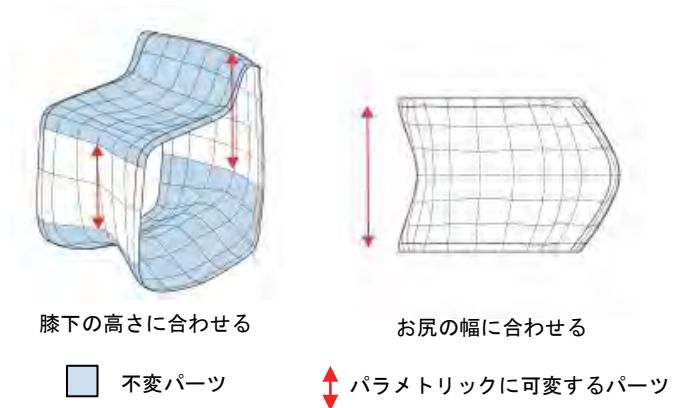


図 2-9. カスタマイズにおける可変要素

2-8. 椅子形状の 3D プリント実証実験の課題

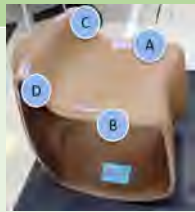
3D プリント製造の制約と快適性を統合した椅子の基本モデル設計を行い、本年度開発した 4 種のフィラーによるバイオ PE コンパウンドから 3D プリントに適合する材料を用いて、専用の大型 3D プリンタにより椅子形状合計 20 脚の製造を行ない、それぞれのコンパウンドの特性に対応する 3D プリント椅子設計製造条件を見いだしたが、家具製品の 3D プリント製造方式と、従来の製造方式に対する CO2 削減効果の実証としては、下記の課題が残っている。

- 製造した 3D プリント椅子形状品は、家具製造専門家(株式会社オカムラ マーケティング本部)により、コロナ禍で顕在化した新しい働き方に合致し、バイオ PE の脱炭素効果とあわせて、新規市場向け家具製品の可能性ありとの評価を得たので、実用性が見込まれる成型品 5 脚について、同社標準とされる強度試験を実施したところ、2 脚については合格したが、材質と形状仕上がり最良とされた 2 脚については合格せず(破損)、3D プリントによる椅子製品製造方式確立するには、さらなるバイオ PE コンパウンド材の層間接着性向上および座面強度を担保する設計・製造方法の開発検証が必要である。
- 3D プリント生産方式については、家具メーカーより小さな設備投資で多品種変量製造が可能な点に期待が寄せられているが、CO2 削減効果については、従来の金型成型に対しての優位性を実証するためには、現在の 2-3 モデルの設計製造から、個別カスタマイズ設計を含む多品種の 3D プリント製造と LCA の検証が必要である。
- LCA の検証としては、製造された椅子の粉砕・ペレット再生加工による椅子の再製造実験を試みたが、材料劣化の測定と改質、強度実験を含む 3D プリント製家具のマテリアル・リサイクルの実証を行う必要がある。

(資料2-1) 3Dプリント製造椅子の強度試験結果

実施協力 株式会社オカムラ

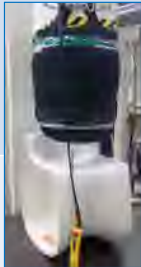
サンプル1 【プリント1層・セルロースファイバー40%】		
試験項目	条件	結果
落下衝撃 (BIFMA規格)	機能荷重 砂袋102kg(225lbs) 高さ152mm 1回	破損 
	保証荷重 砂袋136kg(300lbs) 高さ152mm 1回	機能荷重試験破損で中止
製品衝撃 (OKM規格)	製品10° 傾斜 高さ450mm (JISは200mm) 自由落下10回	機能荷重試験破損で中止
座面静的強度 (JIS規格)	1300N 10sec 10回	機能荷重試験破損で中止

サンプル2 【プリント2層・セルロースファイバー20%】		
試験項目	条件	結果
落下衝撃 (BIFMA規格)	機能荷重 砂袋102kg(225lbs) 高さ152mm 1回	異常なし
	保証荷重 砂袋136kg(300lbs) 高さ152mm 1回	亀裂、破損等なし 変形量測定結果 (試験前 → 機能荷重 → 保証荷重) A:座面左側中央部 504.0mm → 500.0mm → 498.0mm B:座面右側中央部 511.5mm → 508.5mm → 506.0mm C:背面左側上部 619.5mm → 623.0mm → 621.0mm D:背面右側上部 624.5mm → 624.0mm → 625.0mm
製品衝撃 (OKM規格)	製品10° 傾斜 高さ450mm (JISは200mm) 自由落下10回	機能的な異常、各部に異常なし
座面静的強度 (JIS規格)	1300N 10sec 10回 	各部に異常なし 変形量測定結果 (落下衝撃試験後 → 本試験後) A:座面左側中央部 498.0mm → 498.0mm B:座面右側中央部 506.0mm → 506.0mm C:背面左側上部 621.0mm → 617.0mm D:背面右側上部 625.0mm → 624.0mm

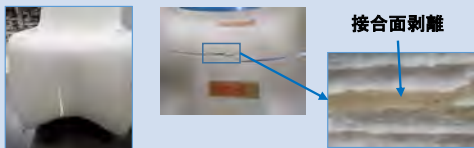
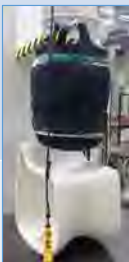
サンプルー2 【プリント2層・セルロースファイバー30%】

試験項目	条件	結果
落下衝撃 (BIFMA規格)	機能荷重 砂袋102kg(225lbs) 高さ152mm 1回	異常なし
	保証荷重 砂袋136kg(300lbs) 高さ152mm 1回	亀裂、破損等なし 変形量測定結果 (試験前 → 機能荷重 → 保証荷重) A:座面左側中央部 487.0mm → 485.0mm → 483.0mm B:座面右側中央部 494.0mm → 491.5mm → 488.0mm C:背面左側上部 601.5mm → 599.5mm → 600.0mm D:背面右側上部 606.0mm → 605.5mm → 603.0mm
製品衝撃 (OKM規格)	製品10° 傾斜 高さ450mm (JISは200mm) 自由落下10回	機能的な異常、各部に異常なし
座面静的強度 (JIS規格)	1300N 10sec 10回 	各部に異常なし 変形量測定結果 (落下衝撃試験後 → 本試験後) A:座面左側中央部 483.0mm → 481.5mm B:座面右側中央部 488.0mm → 488.0mm C:背面左側上部 600.0mm → 599.0mm D:背面右側上部 603.0mm → 599.5mm

バイオプラスチック製3Dプリンタ造形ツール(BPC-11_バイオPE+紙パウダー)

試験項目	条件	結果
1-落下衝撃 (BIFMA規格)	機能荷重 砂袋102kg(225lbs) 高さ152mm×1回	不合格 割れ 
	保証荷重 砂袋136kg(300lbs) 高さ152mm×1回	落下衝撃で破損のため見送り
2-製品衝撃 (OKM規格)	製品10° 傾斜 高さ450mm (JISは200mm) 自由落下10回	落下衝撃で破損のため見送り
3-座面静的強度 (JIS規格)	1300N 10sec×10回	落下衝撃で破損のため見送り

バイオプラスチック製3Dプリンタ造形ツール(BPC-09_バイオPE+紙パウダー)

試験項目	条件	結果
1-落下衝撃 (BIFMA規格)	機能荷重 砂袋102kg(225lbs) 高さ152mm×1回	不合格 割れ 
	保証荷重 砂袋136kg(300lbs) 高さ152mm×1回	落下衝撃で破損のため見送り
2-製品衝撃 (OKM規格)	製品10° 傾斜 高さ450mm (JISは200mm) 自由落下10回	落下衝撃で破損のため見送り
3-座面静的強度 (JIS規格)	1300N 10sec×10回	落下衝撃で破損のため見送り

(資料2-2) 椅子形状の3Dプリントに関する実証実験一覧



製造番号	BPC-01	BPC-02	BPC-03	BPC-04	BPC-05
材料番号	No.11	No.11	No.11	No.11	No.16
フィラー配合割合	CF40%	CF20%	CF30%	CF30%	CF30%
製造条件	8mmノズル 1層	8mmノズル 2層	8mmノズル 2層	8mmノズル 2層	8mmノズル 2層
製造時間	4h10m	8h6m	8h6m	9h17m	7h55m
材料重量	6.2kg	11.4kg	11.1kg	12.9kg	9.4kg

強度試験結果

落下衝撃(機能荷重)	破損	異常なし	異常なし		
落下衝撃(保証荷重)	実施できず	亀裂破損等無し	亀裂破損等無し	—	—
製品衝撃	実施できず	機能的異常無し	機能的異常無し		
座面静的強度	実施できず	各部異常なし	各部異常なし		



製造番号	BPC-06	BPC-07	BPC-08	BPC-09	BPC-11
材料番号	No.14	No.14	No.14	No.18	No.18
フィラー配合割合	変成CF15%	変成CF15%	変成CF15%	紙パウダー26%	紙パルプ30%
製造条件	8mmノズル 2層	8mmノズル 1層	8mmノズル 2層	8mmノズル 2層	6mmノズル 2層
製造時間	7h56m	4h10m	7h55m	7h55m	6h45m
材料重量	11.9kg	6.1kg	12.5kg	10.6kg	9.6kg

強度試験結果

落下衝撃(機能荷重)				破損	破損
落下衝撃(保証荷重)	—	—	—	実施できず	実施できず
製品衝撃				実施できず	実施できず
座面静的強度				実施できず	実施できず



製造番号	BPC-10	BPC-12	BPC-13	BPC-14	BPC-15
材料番号	No.18	No.17	No.18	No.21	No.21
フィラー配合割合	紙パウダー30%	CF30%	紙パウダー30%	CF30%	CF30%
製造条件	5mmノズル 2層	6mmノズル 2層	8mmノズル 1層	6mmノズル 1層	6mmノズル 2層
製造時間	5h	6h57m	5h26m	3h20m	2h40m
材料重量	7.7kg	8.8kg	7.5kg	6.5kg	4.4kg



製造番号	BPC-16	BPC-17	BPC-18	BPC-19	BPC-20
材料番号	No.22	No.25	No.18	No.18	No.14
フィラー配合割合	CF30%	紙パウダー(大)30%	紙パウダー30%	紙パウダー30%	変成CF15%
製造条件	6mmノズル 1層	6mmノズル 1層	6mmノズル 2層	6mmノズル 2層	6mmノズル 2層
製造時間	2h42m	2h2m	3h55m	8h25m	5h50m
材料重量	6kg	3.9kg	5.9kg	12.7kg	8.8kg

3. LCA の検証・評価

3-1. LCA の検証・評価の目的

従来の製造方式における金型製造時と金型による製品成型時の電力によるCO2排出量を調査し、金型を利用しない3Dプリント方式によるCO2削減の効果を明らかにする。3Dプリント製造方式における本事業で開発が進められるバイオPEコンパウンド加工や、椅子形状の製造実験から、事業の最新状況の結果をLCAモデルへ反映する。RPFの熱源の代替効果等についても、LCA結果に大きく影響を与えることが予想されるパラメータを中心に、関係者へのヒアリングによる一次データの取得、適用可能な二次データの入れ替え、シナリオ設定等による感度分析等を行い、算定精度の向上を目指すとともに、誤差範囲の提示を行う。

3-2. 調査範囲

3-2-1. 調査対象の製品システム

本調査で対象とする製品システムを下記に示す。

表 3-1 製品システム

項目	評価対象製品	比較対象製品
製品名	3D プリント製造による バイオポリエチレン製家具	従来型の家具
短縮名称	3D プリント	従来型
仕様	(屋外向け)椅子	

評価対象製品は3Dプリンタを使用して成形したバイオポリエチレン製家具の椅子とし、比較対象は汎用的な製造方法で製造されるプラスチック製の椅子とした。なお、3Dプリンタを用いて成形を行う場合では、原料樹脂に混ぜ込むフィラー(添加剤)が必要となってくる。この時に混ぜ込むフィラーはそれぞれ製造負荷が異なり、また廃棄時の負荷も異なる。よってこのフィラーを変化させた時の感度分析を含んだLCA評価を行った。評価作業はTCO2株式会社に再委任した。

3-2-2. 製品システムが持つ機能

椅子としての機能。

3-2-3. 機能単位及び基準フロー

機能単位は、従来製の椅子 1 脚がその一生において提供する機能とした。なお、3D プリントによる椅子と、従来型の椅子ではその品質が同等であると仮定(今後事業の中で、3D プリント型椅子の耐久性、耐候性の検証が行われる)したことから、基準フローはそれぞれ椅子 1 脚である。

3-2-4. 評価対象における前提条件

今回の評価対象における前提条件の一覧を以下に示す。

表 3- 2 前提条件一覧

名称	従来型	3D プリント	メモ
椅子の重量 (製品重量)	10kg	10kg	製品重量は統一
耐久期間	7 年	7 年	
材料の種類	PP(95%), PE(5%)	バイオ PE + フィラー (30%)	フィラーは製品重量に対しての割合で投入される
成形方法	回転成形	3D プリンタ	
金型あたりの 製造脚数	300 脚	なし	
金型の重量	50.89kg	なし	
金型のアルミ の重量	10.89kg	なし	
金型のアルミ の切削量	5.44kg	なし	
金型フレーム の重量	40.00kg	なし	
金型製造電力	$5.44\text{kg} \times 33.24\text{kWh/kg} \div 181.04\text{kWh}$	なし	フライス加工の切削量の消費電力から推計した
金型製造電力 プロセス	中国電力	なし	
機械の重量	50,000kg	1,000kg	
年間生産量	10000 個	365 個	3D プリンタは椅子のみ 回転成形機械は椅子以外 も製造する想定である

名称	従来型	3D プリント	メモ
製造機械耐用年数	50 年	5 年	
フィラー	なし	セルロースファイバー	
混錬電力	なし	0.056kWh/kg	混錬電力は一次データ
混錬の歩留り	なし	40%	
成形電力	2.75kWh/kg × 10kg=27.5kWh	0.4 kW × 4h=1.6 kWh	3D プリントでは成形時間は実際に出力を行ったヒアリングから設定した
電力プロセス	イタリア電力	日本電力	
製造歩留り	5%	0%	歩留まり分の処理は Post Consumer と同様とした
Post Consumer 廃棄・リサイクル処理	TR: 85%、MR: 15%	TR: 85%、MR: 15%	TR: Thermal Recycle MR: Material Recycle
TR	一般炭の燃焼	一般炭の燃焼	熱量換算 破砕、RPF 化の処理を含む
MR	水平リサイクル	水平リサイクル	破砕、ペレット化の処理を含む
	国内陸上輸送: 50km	国内陸上輸送: 50km	
材料輸送	海外陸上輸送: 50km *1	海外陸上輸送: 50km *2	バイオ PE はブラジル産 *1, *2: 感度分析においてバイオ PE を利用する場合は発生する従来型ではブラジル→イタリア、3D プリンタではブラジル→日本である
	国際海上輸送: 10,500km *1	国際海上輸送: 22,000km	
	国内陸上輸送: 50km	国内陸上輸送: 50km	
製品輸送	海外陸上輸送: 500km	国内陸上輸送: 100km	従来品の製造地はイタリア 3D プリントは使用地近くでの製造を想定
	国際海上輸送: 18,000km		
	国内陸上輸送: 500km		
廃棄物輸送	国内陸上輸送: 50km	国内陸上輸送: 50km	市内輸送

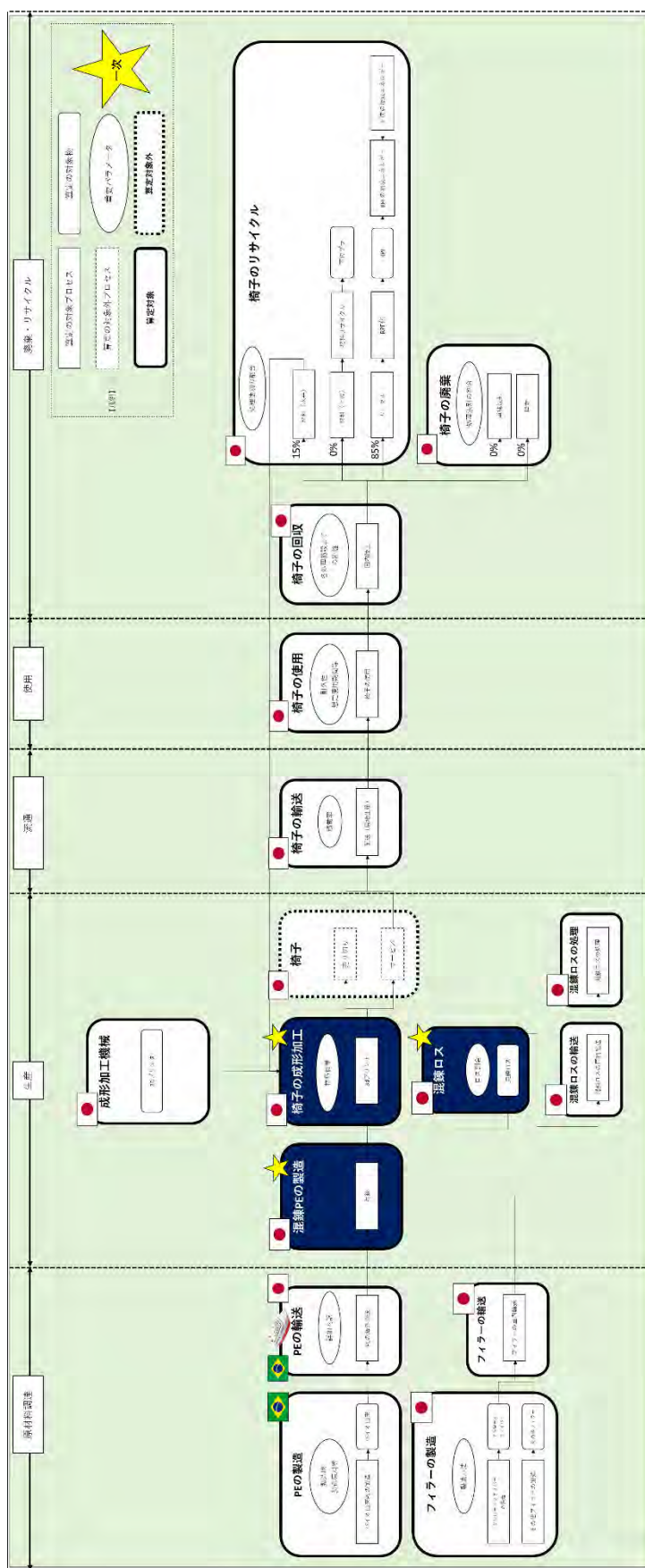


図 3-2 3D プリンタのライフサイクルフロー図

3D プリンタについて椅子の成形加工プロセスについて一次データを収集した。該当するプロセスには黄色の星印をつけた。

3-2-5-2. カットオフ項目

以下についてはカットオフとし、算定には含まれていない。

- ・ 原材料調達段階
 - 原材料の輸送に用いられる梱包材
- ・ 生産段階
 - 従来型の輸送に用いられる梱包材
 - 製造時の機械動作に係る薬品や潤滑油等
- ・ 使用段階
 - 破損時の補修部品等、維持管理に必要な物品
- ・ 廃棄段階
 - 廃棄時の輸送に用いられるフレコン等の資材

3-3. 影響領域と影響評価手法

本調査の影響領域は、気候変動とし、影響評価手法として IPCC 2013 Global Warming Potential 100 years (単位: kg CO₂ eq) を使用した。

3-4. ライフサイクルインベントリ分析 (LCI)

3-4-1. 使用ソフトウェア及びバックグラウンドデータ

LCA 評価を行うにあたって、バックグラウンドデータに LCI データベース IDEA version 2.2 を用い、算定には LCA ソフトウェア SimaPro8.5.2 を用いた。

3-4-2. 一次データ及び二次データの収集

現段階で一次データが取得できるものについては一次データを収集し、難しいものについては文献を用いて二次データを収集した。詳しくは、ライフサイクルフロー図を参照のこと。

3-4-2-1. バイオ PE の製造プロセス

バイオ PE の生産プロセスについては情報が収集出来ず、製造元である Braskem が公開しているバイオ PE の文献値 [Braskem 2017] を引用した。

kgCO ₂ e/kg		
Sugarcane Growing	Agricultural Operations	0,91
	Land Use Change Credits	-1,10
	CO ₂ Uptake	-3,14
		-3,33
Ethanol Production	Ethanol Production	0,03
	Bagasse Burning	0,16
	Electricity Cogeneration Credits	-1,17
		-0,98
I'm Green PE	Ethanol Transport	0,46
	Industrial Operations (Ethylene and PE)	0,76
		1,32
		-3,09

図 3-3 Braskem の文献値 (一部抜粋)

以下に整理した入出力表を示す。エネルギー起源、非エネルギー起源に割り当てたものについては●で示している。

表 3-3 バイオ PE の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位	エネルギー起源	非エネルギー起源
出力	製品	バイオ PE	1	kg		
	大気中の CO2 吸収	Land Use Change Credits	-1.1	kg		●
		CO2 Uptake	-3.14	kg		●
		Electricity Cogeneration Credits	-1.17	kg	●	
入力	大気中への CO2 排出	Agricultural Operations	0.91	kg	●	
		Ethanol Production	0.03	kg	●	
		Bagasse Burning	0.16	kg		●
		Ethanol Transport	0.46	kg	●	
		Industrial Operations (Ethylene and PE)	0.76	kg	●	

収集した文献ではプロセスから排出される CO2 量のみが記載されていたことから、全ての項目を「大気への排出」として分類した。

Land Use Change Credits は土地改変による炭素吸収を表しており、荒れ地から原料となるサトウキビを栽培する耕作地へ改変することによって、土壌中の炭素量が増加し、この炭素が CO2 を土壌へ貯留することから、マイナスの数値が示されている。CO2 Uptake はサトウキビが大気から吸収する CO2 量であり、この量はポリエチレンの完全燃焼から発生する CO2 量の理論値と合致している。Electricity Cogeneration Credits はバイオ PE の生産時に使用される燃料をサトウキビの絞りかすであるバガスを投入することで、使用するはずであった発電燃料を代替し、CO2 の排出量が減少する量を表している。

3-4-2-2. 3D プリンタの成形加工プロセス

3D プリンタの消費電力は [相部 2019]を引用した。本文献では実際に使用予定の機材 Tatami に計測器を付け、消費電力の一次データの収集が行われた。ここで収集した一次データは家具の印刷時に消費される電気量と時間である。実際にプロトタイプの椅子を印刷し、計測器 (HIOKI 社製 電源品質アナライザ 3197 および、クランプオンセンサ 9660 (100A, 300Vmax) 3 本)を用いて計測を行った。



図 3-4 大型 3D プリンタ Tatami

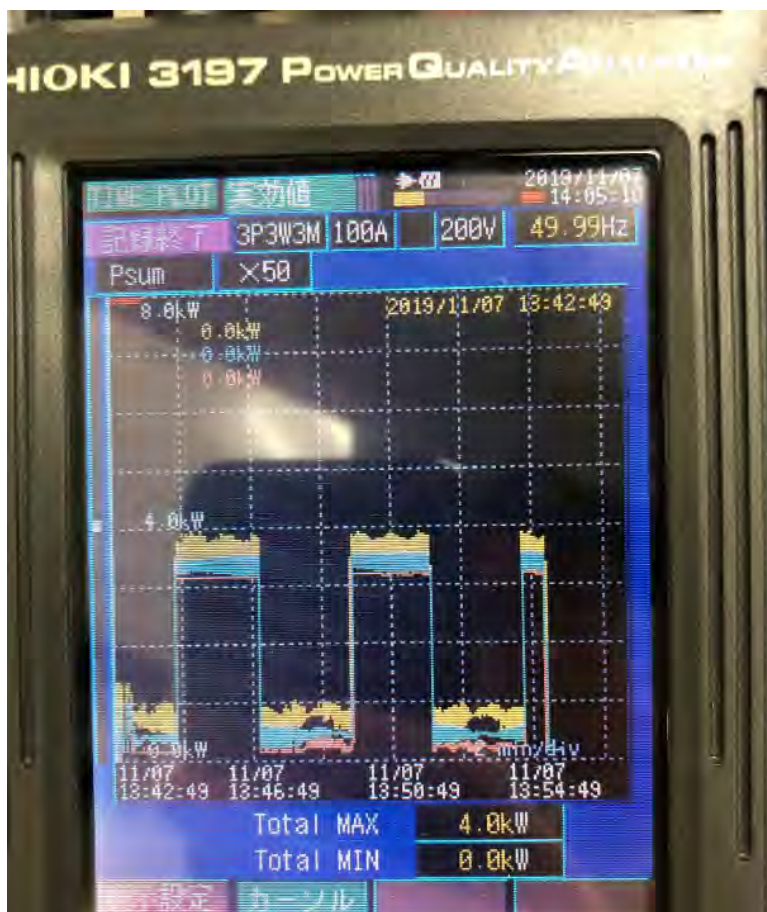


図 3-5 計測器による消費電力測定

計測より 3D プリンタは最大消費電力で 6.6kW、プリント中消費電力で 400W という結果が得られ、また印刷時間は 4 時間/脚であった。後の実験によって 3D プリンタ台の余熱分の電力が必要ない形で印刷できることが明らかとなったため、プリント中消費電力のみで印刷が行われるとした。ここから、3D プリンタの 1 製品あたりの消費電力は

$$0.4(\text{kWh/h}) \times 4 (\text{h/脚}) = \underline{1.6} \text{ kWh/脚}$$

となった。

3D プリンタの重量についてはヒアリングをおこない、重量は約 1 ton との情報を得た。3D プリンタの使用年数を 5 年、年間 365 脚生産を行うと推計し、ここから

$$1,000(\text{kg}) / [365(\text{脚/年}) \times 5(\text{年})] = \underline{0.548} (\text{kg/脚})$$

となった。この値を機械重量として扱った。

なお、加工ロスが発生せず、主原料の混練段階からのロスが 5%起きる事が製造業者へのヒアリングから明らかとなった。以下に整理した入出力表を示す。なお本プロセスでは Material Recycle(MR)が 15%発生するため、MR 分の重量の素材については負荷が計上されていない。

表 3-4 3D プリンタによる 1 脚の製造の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	椅子	1	脚
入力	主原料(バージン分)	プラスチック原料(バイオ PE)	5.95	kg
		フィラー	2.55	kg
	主原料(MR 分)	プラスチック原料(バイオ PE)	1.05	kg
		フィラー	0.45	kg
	エネルギー	電力	1.6	kWh
	資本財	製造機械(鉄)	0.548	kg

3-4-2-3. フィラーの製造プロセス及びフィラーの特徴

フィラーはセルロースファイバーとし文献値を用いた。以下にその詳細を示す。なお、熱量や灰分を示しているのは、TR(Thermal Recycle)において、代替する熱量、焼却後の埋立量を算定するためである。

表 3-5 フィラーの詳細情報一覧

名称	シナリオ	内容、データ源	製造負荷 (kgCO2e/kg)	灰分(%)	熱量 (MJ/kg)
セルロースファイバー	-	製造負荷は [株式会社デコス 2019]より。灰分は [松藤 , 石井 2011]より紙の灰分の平均値を引用した。熱量は [社団法人土木学会 2004]から乾燥と湿潤で変わるため中間値の $(9400+14700)/2=12050\text{KJ/kg}$ を利用した。	0.327	10.30%	12.05 (紙と同等)

以下にセルロースファイバーの整理した入出力表を示す。

表 3-6 セルロースファイバーの入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	セルロースファイバー	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	0.327	kg

3-4-2-4. 従来型の機械重量及び金型重量

回転成形用の機械重量については Web 調査で、50,000 kg、金型重量については中国で回転成形を製造している業者へのヒアリングと 3D プリンタで製造する椅子の図面を用いて厚み 2.3mm、アルミニウムの密度を 2700kg/m³ とし計算から算出し、金型のみの重量は 10.89kg とした。ヒアリングより回転成形の金型は板材の切削を行い製造され、サポート材として金属製のアルミフレームを利用していることが明らかとなり、このフレームの重量を 40kg とした。

ヒアリングと計算の結果から金型本体＋フレームの重量を合わせて 50.89kg とし、本重量を材料の製造プロセスに伴う負荷のみを計上することとした。回転成形用の機械については 50 年使用し、1 年で 1 万回の回転成形を行うとした。

$$50,000 \text{ (kg)} / [10,000 \text{ (回/年)} \times 50 \text{ (年)}] = \underline{0.10} \text{ (kg/回)}$$

となった。この値を椅子一脚あたりの機械分の鉄の重量とした。

また、金型の使用回数については、3D プリンタ製椅子の初年度販売個数予定数を 300 脚としたことから、条件を揃えるため、300 回とした。ここから

$$50.89 \text{ (kg)} / 300 \text{ (回)} = \underline{0.169} \text{ (kg/回)}$$

となった。この値を椅子一脚あたりの金型分のアルミの重量とした。

3-4-2-5. 従来型の金型製造プロセス

従来型の金型の製造には切削加工が用いられていることが Web 調査から明らかとなった。今回この切削プロセスについて、情報が得られず金型重量に対して 50%が切削されるとした。切削プロセス 1kgあたりの消費電力は [Singh , Sultan 2018]より、算出した。以下に文献の該当箇所を示す。



The image shows a screenshot of a software interface with a title bar 'Total (Milling/Turning+Idle+Basic)'. Below the title bar, there are three rows of data, each with a label in a yellow box and a numerical value in a white box. The first row is 'Total Energy Used (Kj/cut)' with the value '1814.3664'. The second row is 'Total Power (KW)' with the value '15.1474'. The third row is 'Wastage (kg/cut)' with the value '0.45562'.

Total (Milling/Turning+Idle+Basic)	
Total Energy Used (Kj/cut)	1814.3664
Total Power (KW)	15.1474
Wastage (kg/cut)	0.45562

図 3-6 切削プロセスの消費電力

切削量が 0.45562kg に対して消費電力が 15.1474kW である。ここから切削 1kg あたりの消費電力を算出した。

$$15.1474(\text{kWh})/0.45562(\text{kg})$$

$$=33.2457(\text{kWh/kg})$$

金型重量が 10kg のため、切削される量は

$$10.89(\text{kg}) \times 1.5$$

$$=16.335(\text{kg})$$

ここから金型の重量を算出すると

$$16.335(\text{kg}) - 10.89(\text{kg})$$

$$=5.445(\text{kg})$$

を切削するとした。

この切削による消費電力は

$$33.2457(\text{kWh/kg}) \times 5.445(\text{kg})$$

$$=181.02\text{kWh}$$

である。

金型の使用回数で除して

$$181.02(\text{kWh/kg})/300(\text{回})$$

$$=0.603(\text{kWh})$$

を金型の使用に計上した。

3-4-2-6. 従来型の成形加工プロセス

従来型の回転成形の電力消費量は [STÅLBERG 2017]に記載の値を用いた。以下に文献の該当箇所を示す。

Table 2. Inventory data for the PE-box, normalised per activity (one box of 500litre), divided into the different scenarios.

	WS1	WS2	WS3
Production PE-box			
INPUT			
PE powder (kg/box)	17,39	23,5	0
Al hinges (kg/box)	0,12	0,16	0
Electricity (MJ/box)	234	234	234
Transport (kg*km)	29787	29787	29787
OUTPUT			
PE-box (kg/box)	23,66	23,66	23,66
Heat loss (MJ/box)	6,8	6,8	6,8

図 3-7 回転成形の消費電力

上記から1箱当たりの電力消費量が明らかとなったためここから、製品 1kgあたりの電力消費量を算出した。

$$234 \text{ (MJ/box)} / 23.66 \text{ (kg/box)} / 3.6 \text{ (MJ/kWh)} \\ = 2.75 \text{ (kWh/kg)}$$

加工ロス は 5%と設定したことから、主原料の投入は 5%多くなり、生じた加工ロスは Post Consumer と同じ処理をされるものとした。以下に整理した入出力表を示す。

表 3-7 回転成形の椅子1脚あたりの資本財の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	椅子	1	脚
	加工ロス	廃プラ(Post Consumer と同じ処理)	0.526	kg
入力	主原料	プラスチック原料(PP+PE)	10.526	kg
	エネルギー	Electricity	27.5	kWh
	資本財	製造機械(鉄)	0.10	kg
		金型(アルミニウム)	0.169	kg
		金型の製造電力	0.603	kWh

3-4-2-7. 廃棄・リサイクルプロセス

廃棄・リサイクルについては従来型、3D プリンタのどちらも同じで 100%リサイクルされるとし、リサイクル方法は TR と MR の 2 つとした。TR では破碎と RPF 化の負荷を計上し、プラスチックの完全燃焼による CO2 排出量を分子式から計上した。この時に得られる熱量については、燃料消費を代替し、代替する燃料は石炭と仮定した。なお 3D プリンタを用いた製造で投入されるフィラーは完全燃焼せず、灰分が残留するため残留分については全量埋立が行われるとした。3D プリンタへ投入されるフィラーはサーマルリサイクル時に完全燃焼されず、灰分として残存する。よってこの残存分についてはサーマルリサイクル後に別途埋立処理されるとして、灰分の埋立量を計上した。フィラーの灰分を示す。

表 3-8 添加剤の灰分残存率

主原料		フィラー	
種類	灰分	種類	灰分
バイオ PE	0%	セルロースファイバー	10.3%

MR について、従来型、3D プリンタのどちらについても水平リサイクルされると仮定し、それぞれ破碎処理とペレット化する負荷を計上した。MR によって製造時の原材料及びフィラーを代替するとして算定を行った。

以下に整理した入出力表を示す。

表 3-9 従来型 TR の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	エネルギー	PP の燃焼	38.9	MJ
		PE の燃焼	1.86	MJ
	大気中への CO2 排出	プラスチックの燃焼	3.14	kg
入力	原材料	廃棄される椅子	1	kg
	リサイクル処理	破碎	1	kg
		RPF 化	1	kg

表 3-10 従来型 MR の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	代替製品	リサイクルペレット(原材料と同等)	1	kg
入力	原材料	廃棄される椅子	1	kg
	プロセス	破砕	1	kg
		ペレット化	1	kg

表 3-11 3D プリンタ TR(プラスチック部分のみ)の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	エネルギー	PE の燃焼	37.1	MJ
	大気中への CO2 排出	プラスチックの燃焼	3.14	kg
入力	原材料	廃棄される椅子	1	kg
	プロセス	破砕	1	kg
		RPF 化	1	kg

表 3-12 3D プリンタ TR(フィラーのみ)の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	エネルギー	セルロースファイバーの燃焼	12.05	MJ
	灰分	セルロースファイバーの灰分	0.103	kg
入力	原材料	廃棄される椅子	1	kg
	プロセス	破砕	1	kg
		RPF 化	1	kg

表 3-13 3D プリンタ TR(フィラーの灰分のみ)の灰分の処理の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
入力	灰分	フィラーの灰分	1	kg
	廃棄物処理	埋立	1	kg

表 3-14 3D プリンタ MR の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	代替製品	リサイクルペレット(原材料と同等)	1	kg
入力	原材料	廃棄される椅子	1	kg
	リサイクル処理	破砕	1	kg
		ペレット化	1	kg

3-5. ライフサイクル影響評価 (LCIA)

3-5-1. 3D プリントと従来型の比較結果

以下に 3D プリント(フィラーにセルローズファイバーを使用した場合)で製造した椅子と、従来型の椅子の LCA 結果を示す。



図 3-8 3D プリントと従来型の LCA 結果

表 3-15 3D プリントと従来型の椅子 1 脚あたりの GHG 排出量の段階別内訳

製品	合計 GHG 排出 量	原材料調達	生産	流通	使用	廃棄・リサイ クル
3D プリント	-12.21	-16.90	1.85	0.14	0.00	2.70
従来型	35.21	20.23	13.16	6.24	0.00	-4.41

kgCO2e/1 脚

3D プリントで製造した場合と従来の方法で製造した場合の LCA 結果は 3D プリントでの製造の方が GHG 排出量は小さくなった。3D プリントは原材料調達による炭素吸収量等がそれ以降の段

階から発生する GHG 排出量を上回るため、結果として椅子を製造すればするほど GHG 排出量が削減される結果となった。一方で、従来型では廃棄・リサイクル段階のみがマイナスになる結果となった。これは椅子の廃棄・リサイクル段階の GHG 排出量の大半を占める TR による燃料代替効果(石炭の燃焼エネルギーを代替すると仮定)が十分大きく、リサイクル処理にかかわる破碎やペレット化、RPF を燃焼した際の GHG 排出量を上回っているからである。なお、3D プリントの TR はその組成に一定量のフィラーを含むため、RPF の発熱量が低くなり、正味では若干のプラスとなる。なお、3D プリントの各材料について、バイオ PE は吸収と排出を分けて表記しているのに対し、フィラーがバイオマス材料の場合はカーボンニュートラルとして吸収も排出もないとして算出していることを付記する。



図 3-9 3D プリントと従来型のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果

表 3-16 3D プリントと従来型のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果 詳細

製品	GHG 起源	合計 GHG 排出量	原材料調達	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル
3D プリント	エネ起	-7.33	9.68	1.75	0.13	0.00	-18.89
	非エネ起	-4.88	-26.59	0.10	0.01	0.00	21.60
従来型	エネ起	5.88	17.66	12.80	5.74	0.00	-30.33
	非エネ起	29.33	2.56	0.36	0.49	0.00	25.91

kgCO2e/1 脚

エネルギー起源(エネ起)、非エネルギー起源(非エネ起)で見ると、3D プリントはエネ起、非エネ起のどちらであってもマイナスとなった。エネ起のマイナス分は TR の代替効果によるもので RPF 燃焼の石炭エネルギーを代替する分の寄与が多く、ライフサイクル全体で合計してもマイナスになる結果となった。非エネ起のマイナス分は原材料であるバイオ PE の原料作物であるサトウキビの炭素吸収と栽培を行った耕作地の土地改変による土壌への炭素固定化分である。このマイナス分がそれ以降の負荷(多くはプラスチックの TR の際の RPF 燃焼時の直接排出量)よりも大きいため、結果として非エネ起もマイナスとなった。

従来型ではエネ起は同様に TR の代替効果によって大幅なマイナスが出るが、原材料の製造負荷、生産段階の電力消費からの排出よりは少ないため、結果としてエネ起はプラスとなった。なおプラスチックのモノマー製造時のクラッカーはエネ起として計上している。非エネ起では、バイオのような炭素吸収量は存在せず、TR の際の燃焼時の直接排出量が大きいため、大幅なプラスになる結果となった。

次にエネルギー起源と非エネルギー起源の結果を SimaPro のネットワーク図の形式で示す。ネットワーク図の「赤線」は上流のプロセスの GHG 排出量を表しており、「緑線」は代替効果で控除された GHG 排出量を表している。線の太さが影響の大きさを表しており、GHG 排出量が多い場合には太い線で描画されることになる。

また、全ての上流プロセスを表示することはできないため、表示の際にカットオフを適用し(データの積算計算においてカットオフは行っていない)、一定のパーセンテージ以下の結果に影響を与えないプロセスについては表示していない図である。さらに、今回の算定では商用 LCA データベース IDEA を使用していることから、ライセンス上、報告書に含めることができないプロセスについては数値をマスキングして表示した。

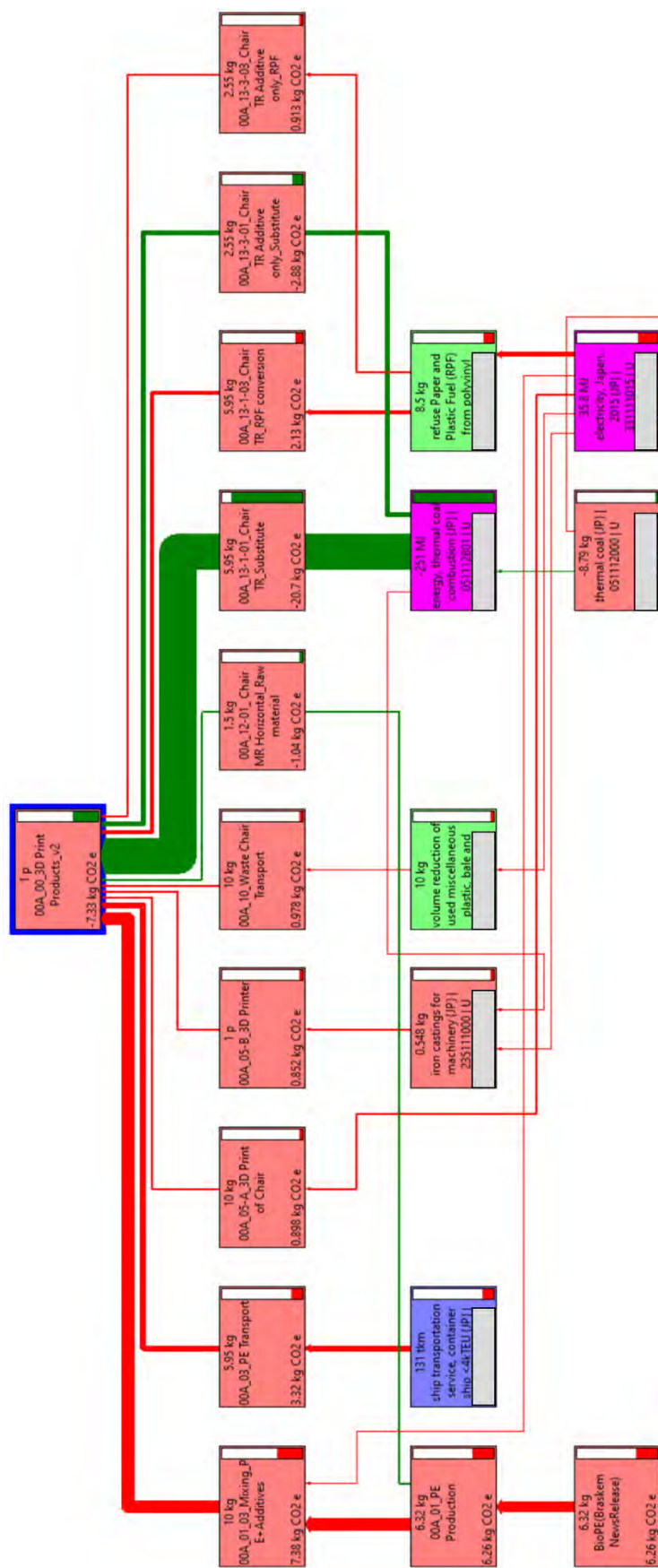


図 3-10 3D プリントのエネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ:3%)

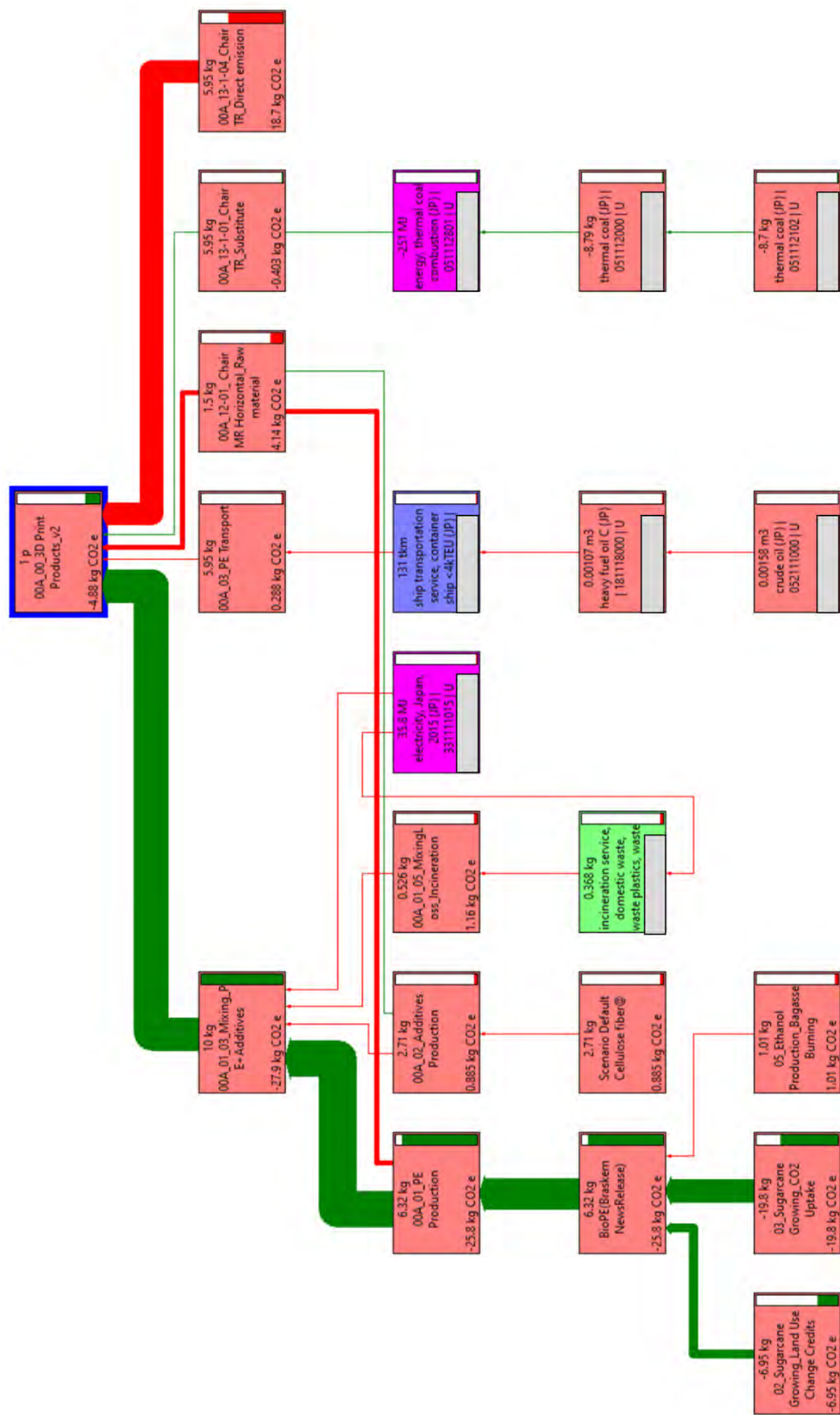


図 3-11 3D プリンターの非エネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 0.5%)

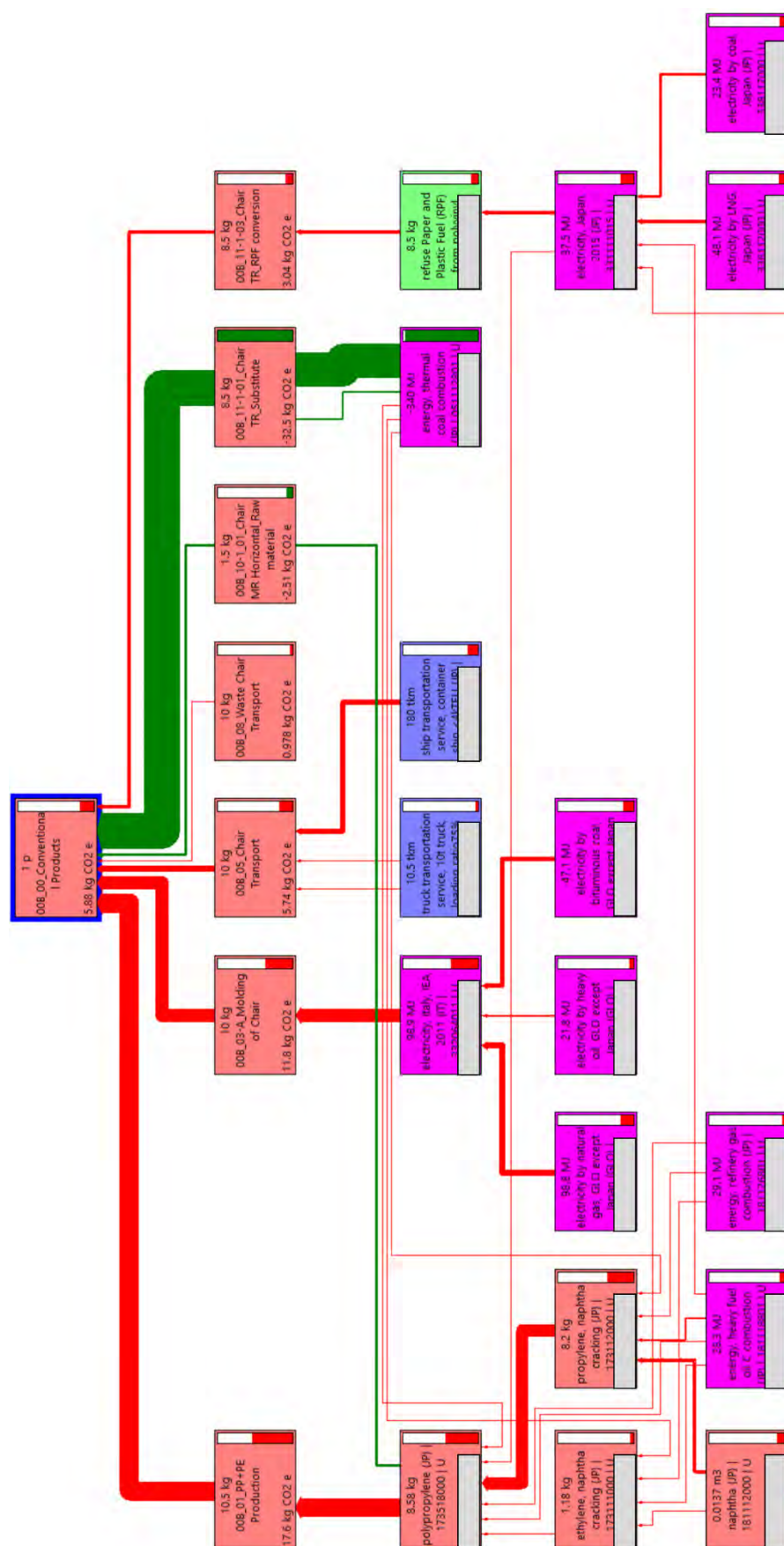


図 3-12 従来型のエネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 3%)

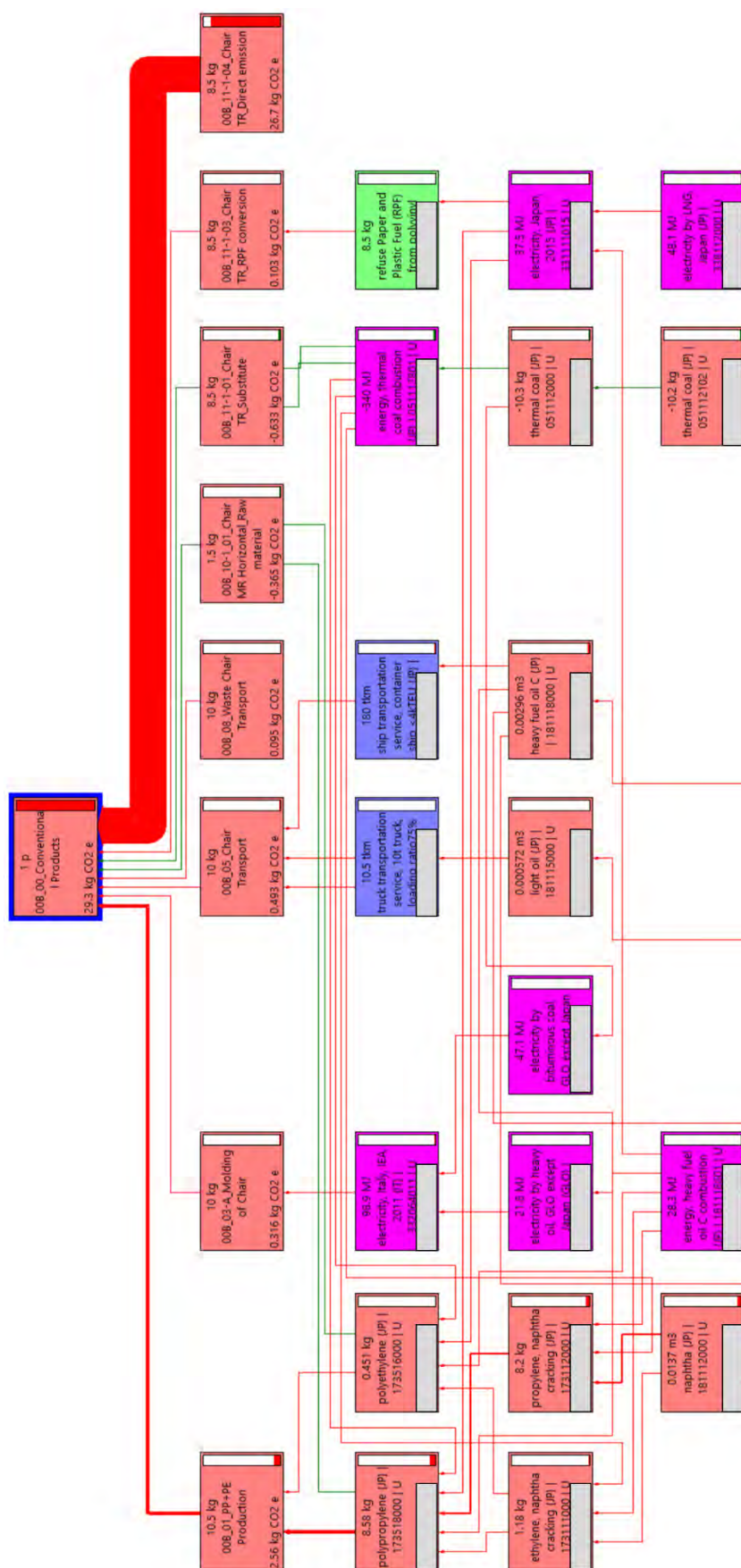


図 3-13 従来型の非エネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 0.3%)

3D プリントのネットワーク図を参照すると、エネ起の図からは、TR による石炭代替効果(Chair_TR_Coal_substitute)が非常に大きく、バイオ PE とフィラーの製造(Mizing_PE+Additives)とブラジルからの輸送(PE_Transport)、加工(3D_Print_of_Chair)等他の各工程を合計した値よりも大きく正味でマイナスとなる。一方、非エネ起の図からは、バイオ PE の製造(PE_Production)のマイナス分の影響が最も大きい。このマイナスはサトウキビ栽培時の炭素吸収(Sugarcane Growing_CO2_Uptake)及び、土地利用変化に伴う土壌炭素の増加(Sugarcane_Growing_Land_use_Change_Credits)の効果によるものである。一方、排出量の増加要因としては、TR の RPF 燃料を燃焼した時の直接排出(Chair_TR_Direct_emission)、MR によって控除される原料(Chari_MR_Horizontal_Raw material)による影響が大きい。

従来型のネットワーク図を参照すると、エネ起の図では、やはり TR による石炭代替効果(Chair_TR)が最も大きいものの、石化プラスチック原材料の製造(PP+PE_Production)、加工(Molding of Chair)で用いる電力、製品のイタリアからの輸送(Chair_Transport)の合計よりも小さく、正味でプラスの排出量となった。一方、非エネ起の図では、TR の排出量(Chair_TR)が支配的で、残りのプロセスは少量の寄与が見られる。

以上、今回の算定条件下では、従来型の椅子の製造から 3D プリンタの椅子の製造に変更することによって、エネ起では少量の、非エネ起では大きく GHG 排出量が削減される結果となった。

3-5-2. 感度分析：シナリオ分析

感度分析として、従来型及び 3D プリンタ製の椅子の原料を石油由来 PE、バイオ由来 PE の場合と同一製品を大量生産、一品一葉の製品を製造する場合の計 8 シナリオを立てて算定を行った。なお石油由来 PE を利用する場合には同一国内の工場から調達、バイオ PE を利用する場合には原料をブラジルから調達とし、従来型については金型の使用回数が大量生産の場合には 45000 回、一品一葉の場合には 1 回として算定を行った。8 シナリオの詳細を以下に示す。

表 3-17 8 シナリオ詳細

シナリオ名	シナリオ詳細	原材料の生産地	原材料の輸送	成形地	製品の輸送
シナリオ 1	1. 同じものの大量生産・石化PE・金型	イタリア(日本の原単位を使用)	海外陸上輸送:50km	イタリア	イタリア→日本(18000km)
シナリオ 2	2. 同じものの大量生産・石化PE・3D プリンタ	日本	国内陸上輸送:50km	日本	日本国内:100km
シナリオ 3	3.同じものの大量生産・バイオPE・金型	ブラジル	ブラジル→イタリア(10500km)	イタリア	イタリア→日本(18000km)
シナリオ 4	4.同じものの大量生産・バイオPE・3D プリンタ	ブラジル	ブラジル→日本(22000km)	日本	日本国内:100km
シナリオ 5	5.ひとつずつすべて異なるものが作られる・石化PE・金型	イタリア(日本の原単位を使用)	海外陸上輸送:50km	イタリア	イタリア→日本(18000km)
シナリオ 6	6.ひとつずつすべて異なるものが作られる・石化PE・3D プリンタ	日本	国内陸上輸送:50km	日本	日本国内:100km
シナリオ 7	7.ひとつずつすべて異なるものが作られる・バイオPE・金型	ブラジル	ブラジル→イタリア(10500km)	イタリア	イタリア→日本(18000km)
シナリオ 8	8. ひとつずつすべて異なるものが作られる・バイオPE・3D プリンタ	ブラジル	ブラジル→日本(22000km)	日本	日本国内:100km

本調査においてはシナリオ 1 とシナリオ 4 もしくはシナリオ 8 の比較となっており、シナリオ 2 とシナリオ 6、シナリオ 4 とシナリオ 8 においては 3D プリンタは金型の使用がないため、GHG 排出量は全く同一となった。

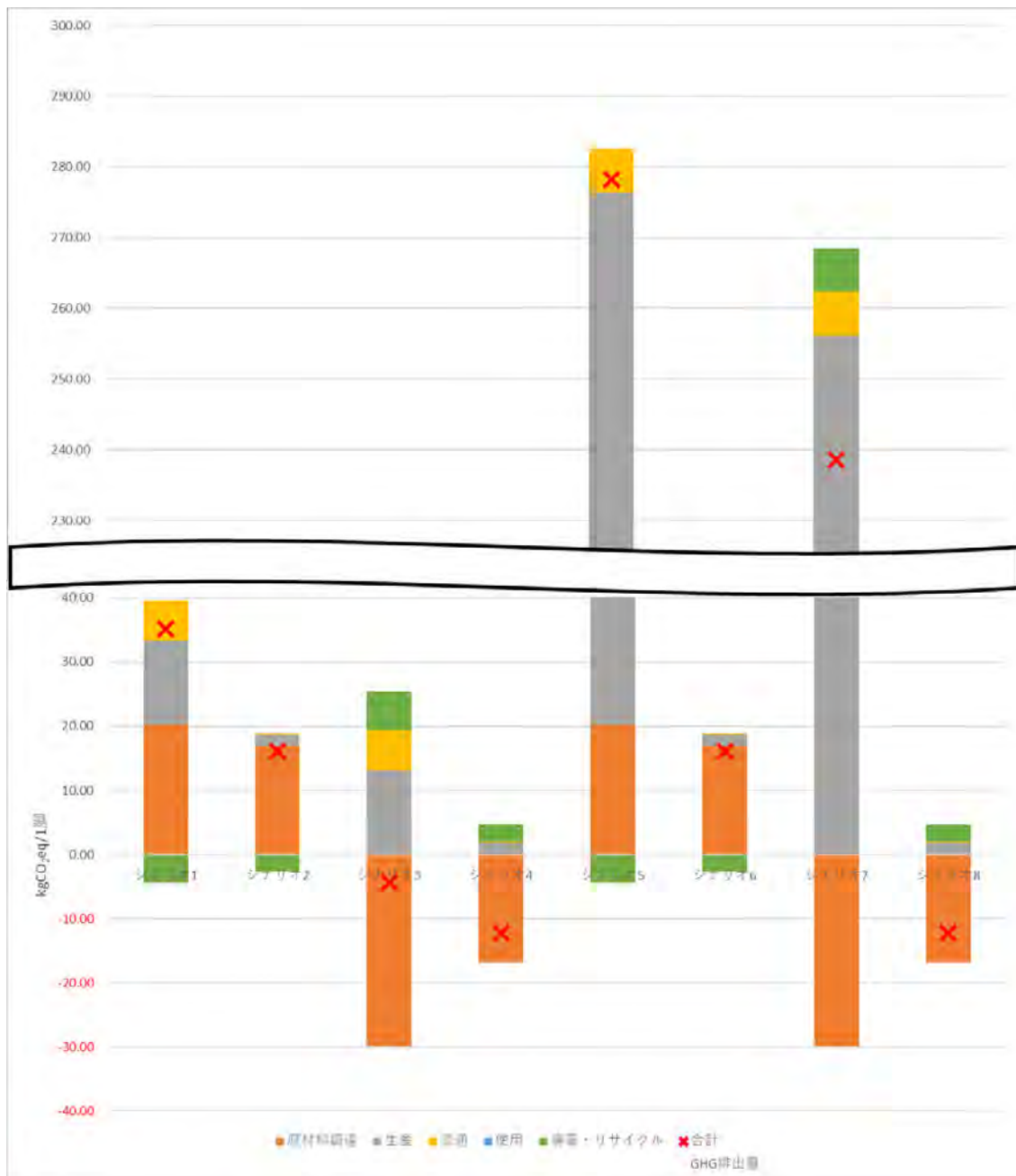


図 3-14 シナリオ別の LCA 結果

シナリオ 5、シナリオ 7 については GHG 排出量が大きいので、中間を省略して表示している。

表 3-18 シナリオ別の LCA 結果 詳細

シナリオ名	合計 GHG 排出量	原材料調達	生産	流通	使用	廃棄・リサイ クル
シナリオ1	35.21	20.23	13.16	6.24	0.00	-4.41
シナリオ2	16.15	16.82	1.85	0.14	0.00	-2.66
シナリオ3	-4.35	-29.85	13.16	6.24	0.00	6.10
シナリオ4	-12.21	-16.85	1.85	0.14	0.00	2.65
シナリオ5	278.19	20.23	256.13	6.24	0.00	-4.41
シナリオ6	16.15	16.82	1.85	0.14	0.00	-2.66
シナリオ7	238.64	-29.85	256.13	6.24	0.00	6.11
シナリオ8	-12.21	-16.85	1.85	0.14	0.00	2.65

kgCO₂e/1脚

図 3-15 シナリオ別のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果



シナリオ 5、シナリオ 7 については GHG 排出量が大きいため、中間を省略して表示している。

表 3-19 シナリオ別のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果 詳細

シナリオ名	GHG 起源	合計 GHG 排出量	原材料調達	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル
シナリオ1	工ネ起	5.88	17.66	12.80	5.74	0.00	-30.33
	非工ネ起	29.33	2.56	0.36	0.49	0.00	25.91
シナリオ2	工ネ起	-5.92	12.91	1.75	0.13	0.00	-20.71
	非工ネ起	22.07	3.90	0.10	0.01	0.00	18.06
シナリオ3	工ネ起	5.08	12.89	12.80	5.74	0.00	-26.35
	非工ネ起	-9.42	-42.73	0.36	0.49	0.00	32.46
シナリオ4	工ネ起	-7.33	10.72	1.75	0.13	0.00	-19.93
	非工ネ起	-4.88	-27.57	0.10	0.01	0.00	22.58
シナリオ5	工ネ起	240.99	17.66	247.90	5.74	0.00	-30.32
	非工ネ起	37.20	2.56	8.23	0.49	0.00	25.91
シナリオ6	工ネ起	-5.92	12.91	1.75	0.13	0.00	-20.71
	非工ネ起	22.07	3.90	0.10	0.01	0.00	18.06
シナリオ7	工ネ起	240.19	12.89	247.90	5.74	0.00	-26.35
	非工ネ起	-1.55	-42.73	8.23	0.49	0.00	32.46
シナリオ8	工ネ起	-7.33	10.72	1.75	0.13	0.00	-19.93
	非工ネ起	-4.88	-27.57	0.10	0.01	0.00	22.58

kgCO₂e/1脚

GHG 排出量の内訳をより詳細に示した結果を以下に示す。

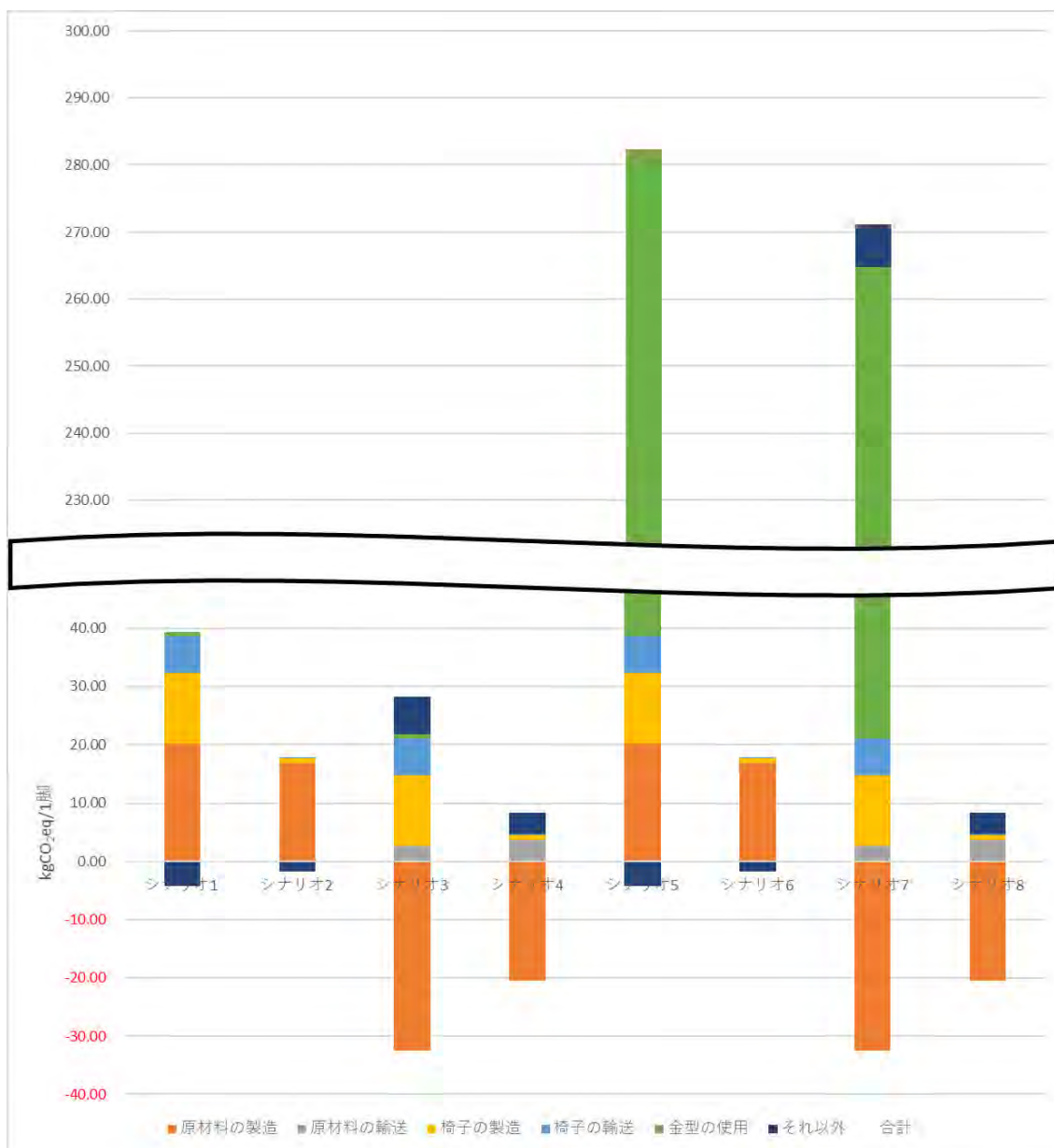


図 3-16 シナリオ別の LCA 結果詳細化

シナリオ 5、シナリオ 7 については GHG 排出量が大きいため、中間を省略して表示している。

表 3-20 シナリオ別の LCA 結果詳細化の内訳

シナリオ名	合計	原材料の製造	原材料の輸送	椅子の製造	椅子の輸送	金型の使用	それ以外
シナリオ1	35.21	20.17	0.06	12.13	6.24	0.81	-4.20
シナリオ2	16.15	16.76	0.06	0.93	0.14	0.00	-1.74
シナリオ3	-4.35	-32.53	2.68	12.13	6.24	0.81	6.32
シナリオ4	-12.21	-20.48	3.63	0.93	0.14	0.00	3.57
シナリオ5	278.19	20.17	0.06	12.13	6.24	243.79	-4.19
シナリオ6	16.15	16.76	0.06	0.93	0.14	0.00	-1.74
シナリオ7	238.64	-32.53	2.68	12.13	6.24	243.79	6.32
シナリオ8	-12.21	-20.48	3.63	0.93	0.14	0.00	3.57

kgCO₂e/1脚

シナリオから従来型について、石油 PE を利用した場合(シナリオ 2)、3D プリンタの製造にかかわる消費電力量の小ささと国内、近隣で製造が可能のため椅子の製造、椅子の輸送の GHG 排出量が従来型と比較して小さい。椅子の製造については回転成形と 3D プリントの比較であるが回転成形は消費電力が多く、椅子の製造段階の GHG 排出量では約 12 倍の負荷が発生している。シナリオ 2 はバイオ PE による炭素吸収が行われないため、合計 GHG 排出量はプラスとなるが合計 GHG 排出量はシナリオ 1 よりも小さくなった。

従来型のバイオ PE を利用した場合(シナリオ 3)であってもエネ起はマイナスとならず、合計 GHG 排出量でみても 3D プリンタ程のマイナス効果は得られず、3D プリンタ製造が優位である事を示すことが出来た。シナリオ 3 のエネ起がマイナスにならないのはシナリオ 1 と同様に原材料製造の負荷と回転成形の負荷が大きく、さらに原材料のブラジルからイタリアまでの輸送負荷、イタリアから日本までの輸送負荷が計上されるため、TR による石炭燃焼の代替効果のマイナスを上回ってしまうことが影響をしている。

シナリオ 5、シナリオ 7 は金型を 1 回のみ使用するとして算定を行っており、金型製造負荷が 1 脚の椅子に計上され、合計 GHG 排出量が大きくなっている。シナリオ 6、シナリオ 8 については、3D プリンタは金型の使用がないため同一製品の大量生産、一品一葉の製造を行ったとしても GHG 排出量は全く同一となり、これらの結果から 3D プリンタを用いた製造の優位性が明らかとなった。

3-5-3. CO2 削減効果

次に従来型の椅子を3Dプリンタ製の椅子(セルロースファイバー)へ置き換えた際のCO2削減効果を示す。生産量については、実証事業終了時点において年間で365脚を製造し、2030年時点では年間36,500脚製造するとして削減効果の算定を行った。現在の3Dプリンタの製造効率は1日あたり1脚であることから、実証事業終了時点では1台、2030年には100台の3Dプリンタが導入されて製造を行うことを想定して算定を行った。以下に前提条件の一覧と段階別の内訳を示す。

表 3-21 前提条件一覧

製品	年度	使用機械数(台)	生産数(脚)
評価対象製品	事業終了年度	1	365
	2030 年度	100	36500
ベースライン	事業終了年度	1	365
	2030 年度	1	36500

①評価対象製品		(対象製品をご記入ください)		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	4	(10)	(6)
	生産	1	0	1
	流通	0	0	0
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(7)	8	1
	合計	(3)	(2)	(4)
②ベースライン		(ベースラインをご記入ください)		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	6	1	7
	生産	5	0	5
	流通	2	0	2
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(11)	9	(2)
	合計	2	11	13
③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	3	11	14
	生産	4	0	4
	流通	2	0	2
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(4)	2	(3)
	合計	5	12	17

図 3-17 実証事業終了時点(年間 365 脚製造の場合)

①評価対象製品		(対象製品をご記入ください)		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
普及段階 2030年時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	 353	 (970)	 (617)
	生産	 64	 3	 67
	流通	 5	 0	 5
	使用	 0	 0	 0
	廃棄・リサイクル	 (690)	 788	 99
	合計	 (268)	 (178)	 (446)
②ベースライン		(ベースラインをご記入ください)		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
普及段階 2030年時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	 645	 94	 738
	生産	 467	 13	 480
	流通	 210	 18	 228
	使用	 0	 0	 0
	廃棄・リサイクル	 (1,107)	 946	 (161)
	合計	 215	 1,071	 1,285
③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
普及段階 2030年時点 (t-CO2/年)	原材料調達・生産	 291	 1,064	 1,355
	生産	 403	 10	 413
	流通	 205	 18	 223
	使用	 0	 0	 0
	廃棄・リサイクル	 (417)	 158	 (260)
	合計	 482	 1,249	 1,731

図 3-18 2030 年時点 (年間 36,500 脚製造の場合)

3-6. 課題

- 今回の算定においては、3D プリンタと従来型の椅子では製品重量も使用期間も同じであると設定した仮想的な製品を用いた。一方で、実際にはビジネスモデル等によって、3D プリンタ製と従来型の椅子の重量も使用回数も異なってくる可能性が高い。事業が進行するに伴って、3D プリンタで代替される従来型の椅子、3D プリンタで製造される椅子の具体像がより明確になってくると思われるが、今後はこのような実際のビジネスモデルに即した評価を行う必要がある。
- 従来型の回転成形は文献に記載された値を使用した。当該文献で製造される製品と今回の製品では重量が完全には合致していない。比較対象となるベースライン製品について、その成形方法及び成形に伴う使用電力については再度詳細に調査を行う必要がある。
- 現在の算定結果では従来型に関して金型製造についてはヒアリングより得たデータと計算値を利用したが、切削量については情報が得られず仮定値を利用している。今後金型の加工負荷の実態についてはより精査し、算定の精度を高めていく必要がある。
- 従来型について、加工ロスは一律 5%と設定し、その処理も廃棄・リサイクル段階と同じ処理と仮定しているが、今後精査が必要である。
- フィラーの製造時の一次データが収集できておらず、文献等から、原単位化された二次データを用いている。3D プリンタではフィラーの混合率と製造負荷が全体へ影響を大きく与えるため、今後可能な限り実態に即した一次データを収集し、精度を向上することが望ましい。
- 廃棄・リサイクル段階について、現在のリサイクル率とリサイクル方法の割合は、広範な家具を対象とした推計値を利用しており、椅子の実態に即した値ではない可能性がある。また従来型と 3D プリンタで、リサイクル方法及びその割合について同じ値を用いているが、実際には 3D プリンタと従来型ではこれらの方法や割合が異なる事も想定されるため、今後より詳細な検討が必要である。
- TR, MR の回避効果について、現在 TR は石炭エネルギー、MR はバージン品と同等であるとの前提を置いているが、今後実態に応じた精査が必要である。なお、3D プリンタと従来型の相対的な比較という意味では、条件を双方で揃えている限りは、傾向に大きな変化はないと思われる。

3-7. 引用文献

- Braskem. “I’m green™ PELife Cycle Assessment.” Braskem - Braskem. 2017 年 9 月 6 日.
<http://plasticoverde.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/ModuloHTML/Documentos/1191/Life-Cycle-Assessment-v02.pdf>.
- Earth Engineering Center City College of New York. DETERMINING ACCURATE HEATING VALUES OF NON-RECYCLED PLASTICS (NRP) . New York: City University of New York, 2016.
- Singh Karmjit, , Sultan A. Ibrahim. A Computer-Aided Sustainable Modelling and Optimization Analysis of CNC Milling and Turning Processes. Switzerland: J. Manuf. Mater. Process, 2018.
- STÅLBERG AXÉN LISA. Comparative LCA of street sandboxes made of polyethylene and glass fibre reinforced plastic. CHALMERS University of Technology, 2017.
- 株式会社デコス. “エコリーフ タイプ III 環境宣言 (EPD).” 2019 年 7 月 1 日.
https://ecoleaf-label.jp/pdf_view.php?uuid=e83e8d73-c946-4192-8546-2766f8bb6e84.pdf&filename=JR-AU-19001E.pdf.
- 社団法人土木学会. 環境工学公式・モデル・数値集. 新宿区: 社団法人土木学会, 2004.
- 松藤敏彦, , 石井翔太. “家庭系ごみ中可燃性成分の特性値データベース作成とその利用法に関する研究.” 2011.
- 相部. Tatami の消費電力測定結果. 慶應大学, 2019.

3-8. LCA ソフトウェアへの実装の詳細

3-8-1. SimaPro への実装

ここまでに収集を行ったデータの内、二次データを新規プロセスとして SimaPro 上に実装した。以下に実装したプロセス名を示す。

表 3-22 実装したプロセス一覧

カテゴリ	対象物	SimaPro 実装名	メモ
バイオプラスチック	バイオ PE	BioPE(Braskem NewsRelease)	以下の 01~08 までのプロセスを内包している
		01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations	
		02_Sugarcane Growing_Land Use Change Credits	
		03_Sugarcane Growing_CO2 Uptake	
		04_Ethanol Production_Ethanol Production	
		05_Ethanol Production_Bagasse Burning	
		06_Ethanol Production_Electricity Cogeneration Credits	
		07_I'm Green PE_Ethanol Transport	
添加剤	CNF	08_I'm Green PE_Industrial Operations (Ethylene and PE)	
		Cellulose Nanofibers(CNF)	以下の 01~06 までのプロセスを内包している
		01_planting and logging	
		02_chipping	
		03_transportation	
		04_preliminary grinding	

カテゴリ	対象物	SimaPro 実装名	メモ
		05_fine grinding	
		06_classifying	

3-8-1-1. 基本フローの調整

まず実装に当たってはエネルギー起源、非エネルギー起源の発生源別に分割をするために SimaPro 上の基本フローを調整した。方法はエネルギー起源のプロセスから発生する Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified をエネルギー起源と明らかになるように基本フローを別のものへ変更をした。この際に使用する基本フローは、変更したプロセスの IDEA 製品コードの頭 2 桁を付けたものである。

Outputs to technosphere: Products and co-products		Amount	Unit	Quantity	Allocati	Category
energy, anthracite coal combustion (PJ) 051112802 U		1	MJ	Energy	100 %	...\051 Coal And Li

変更前	変更後
Emissions to air	Emissions to air
Emissions, methane (fossil), air, unspecified	Emissions, methane (fossil), air, unspecified
Emissions, Particulates (PM2.5), air, urban high stacks	Emissions, Particulates (PM2.5), air, urban high stacks
Emissions, sulfur dioxide, air, urban high stacks	Emissions, sulfur dioxide, air, urban high stacks
Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 05
Emissions, NOx, air, urban high stacks	Emissions, NOx, air, urban high stacks
Emissions, nitrous oxide, air, unspecified	Emissions, nitrous oxide, air, unspecified

図 19 エネ起に対応する基本フローの調整例

上記の書き換えを行ったプロセスはおおむねプロセスの名称の最初に energy とついているプロセスであり、一部のプロセスはエネルギー起源と考えられるが、energy とついていないプロセスである。以下に書き換えを行ったプロセスと変更した基本フロー名を示す。

表 3-23 調整を行ったプロセス一覧

プロセス名	変更した基本フロー	備考
crude oil, imported {JP} 052111222 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 05	
energy, anthracite coal combustion {JP} 051112802 U		
energy, coking coal, for blowing combustion {JP} 051111802 U		
energy, coking coal, for coke combustion {JP} 051111801 U		
energy, crude oil combustion {JP} 052111801 U		
energy, liquefied natural gas (LNG) combustion {JP} 052112802 U		
energy, LNG, internal combustion engine, diesel engine, except transportation use {JP} 052112875 U		
energy, LNG, internal combustion engine, gas turbine, except transportation use {JP} 052112874 U		
energy, natural gas combustion {JP} 052112801 U		
energy, natural gas liquids (NGL) combustion {JP} 052112805 U		
energy, natural gas, internal combustion engine, gas turbine, except transportation use {JP} 052112896 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 17	
energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U		
C4 distillate, naphtha cracking {JP} 173119000 U		
cracked gasoline, naphtha cracking {JP} 173118000 U		
energy, dimethyl ether (DME) combustion {JP} 173919802 U		
energy, ethyl tertiarybutyl ether (ETBE) combustion {JP} 173949802 U		
energy, methane combustion {JP} 173919803 U		
energy, methanol combustion {JP} 173919801 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
ethylene, naphtha cracking {JP} 173111000 U		
hydrogen-rich gas, naphtha cracking {JP} 172312102 U		
methane rich gas, naphtha cracking {JP} 173919111 U		
propylene, naphtha cracking {JP} 173112000 U		
energy, blast furnace gas (BFG) combustion {JP} 183112802 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 18	
energy, briquette and oval briquette combustion {JP} 189111801 U		
energy, coke combustion {JP} 183111801 U		
energy, coke oven gas (COG) combustion {JP} 183112801 U		
energy, coke, for iron and steel combustion {JP} 183111803 U		
energy, electric furnace gas (EFG) combustion {JP} 183112804 U		
energy, gasoline combustion {JP} 181111801 U		
energy, heavy fuel oil A combustion {JP} 181116801 U		
energy, heavy fuel oil B combustion {JP} 181117801 U		
energy, heavy fuel oil C combustion {JP} 181118801 U		
energy, hydrocarbon oil combustion {JP} 181125801 U		
energy, jet fuel oil combustion {JP} 181113801 U		
energy, kerosene combustion {JP} 181114801 U		
energy, kerosene, internal combustion engine, gas turbine, except transportation use {JP} 181114874 U		
energy, LD-converter gas (LDG) combustion {JP} 183112803 U		
energy, light oil combustion {JP} 181115801 U		
energy, light oil, internal combustion engine, diesel engine, except transportation use {JP} 181115875 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
energy, light oil, internal combustion engine, gas turbine, except transportation use {JP} 181115874 U		
energy, liquefied petroleum gas (LPG) combustion {JP} 181124801 U		
energy, liquefied petroleum gas (LPG), internal combustion engine, gas turbine, except transportation use {JP} 181124876 U		
energy, naphtha combustion {JP} 181112801 U		
energy, oil cokes combustion {JP} 189919801 U		
energy, petroleum-based hydrocarbon gas combustion {JP} 181126802 U		
energy, refinery gas combustion {JP} 181126801 U		
energy, tar combustion {JP} 183113801 U		
naphtha {JP} 181112000 U		
electricity by anthracite, GLO except Japan {GLO} 338212000 U		
electricity by bituminous coal, GLO except Japan {GLO} 338213000 U		
electricity by coal, Japan {JP} 338117000 U		
electricity by COG, Japan {JP} 338111000 U		
electricity by coke oven gas, GLO except Japan {GLO} 338227000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 33	
electricity by coke, GLO except Japan {GLO} 338226000 U		
electricity by crude oil, GLO except Japan {GLO} 338216000 U		
electricity by crude oil, Japan {JP} 338115000 U		
electricity by gasoline, GLO except Japan {GLO} 338218000 U		
electricity by heavy oil, GLO except Japan {GLO} 338222000 U		
electricity by heavy oil, Japan {JP} 338116000 U		
electricity by kerosene, GLO except Japan {GLO} 338220000 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
electricity by light oil, GLO except Japan {GLO} 338221000 U		
electricity by light oil, Japan {JP} 338114000 U		
electricity by lignite, GLO except Japan {GLO} 338215000 U		
electricity by liquefied petroleum gas, GLO except Japan {GLO} 338223000 U		
electricity by LNG, Japan {JP} 338112000 U		
electricity by LPG, Japan {JP} 338113000 U		
electricity by naphtha, GLO except Japan {GLO} 338219000 U		
electricity by natural gas, GLO except Japan {GLO} 338217000 U		
electricity by subbituminous coal, GLO except Japan {GLO} 338214000 U		
energy, town gas 13A combustion {JP} 341111801 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 34	
rail transportation service, freight {JP} 421211000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 42	
rail transportation service, passenger {JP} 421111000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 43	
contracted omnibus transportation service {JP} 431112000 U		
omnibus transportation service {JP} 431111000 U		
passenger vehicle transportation service, business use {JP} 432111000 U		
passenger vehicle transportation service, private, cars with engine size less than 660cc {JP} 433112000 U		
passenger vehicle transportation service, private, except cars with engine size less than 660cc {JP} 433111000 U		
private bus transportation service {JP} 431113000 U		
special-purpose vehicle transportation service, business use {JP} 441113000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 44	
special-purpose vehicle transportation service, private {JP} 442113000 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio average {JP} 441113104 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio0% {JP} 441113107 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio10% {JP} 441113106 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio100% {JP} 441113101 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio25% {JP} 441113105 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio50% {JP} 441113103 U		
tank lorry transportation service, 10kl tank, loading ratio75% {JP} 441113102 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio average {JP} 441113204 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio0% {JP} 441113207 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio10% {JP} 441113206 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio100% {JP} 441113201 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio25% {JP} 441113205 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio50% {JP} 441113203 U		
tank lorry transportation service, 16kl tank, loading ratio75% {JP} 441113202 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio average {JP} 441113304 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio0% {JP} 441113307 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio10% {JP} 441113306 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio100% {JP} 441113301 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio25% {JP} 441113305 U		
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio50% {JP} 441113303 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
tank lorry transportation service, 20kl tank, loading ratio75% {JP} 441113302 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio average {JP} 441111104 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio0% {JP} 441111107 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio10% {JP} 441111106 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio100% {JP} 441111101 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio25% {JP} 441111105 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio50% {JP} 441111103 U		
truck transportation service, 1.5t truck, loading ratio75% {JP} 441111102 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio average {JP} 441111404 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio0% {JP} 441111407 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio10% {JP} 441111406 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio100% {JP} 441111401 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio25% {JP} 441111405 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio50% {JP} 441111403 U		
truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio average {JP} 441111504 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio0% {JP} 441111507 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio10% {JP} 441111506 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio100% {JP} 441111501 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio25% {JP} 441111505 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio50% {JP} 441111503 U		
truck transportation service, 15t truck, loading ratio75% {JP} 441111502 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
truck transportation service, 20t truck, loading ratio average {JP} 441111604 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio0% {JP} 441111607 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio10% {JP} 441111606 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio100% {JP} 441111601 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio25% {JP} 441111605 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio50% {JP} 441111603 U		
truck transportation service, 20t truck, loading ratio75% {JP} 441111602 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio average {JP} 441111204 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio0% {JP} 441111207 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio10% {JP} 441111206 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio100% {JP} 441111201 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio25% {JP} 441111205 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio50% {JP} 441111203 U		
truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio average {JP} 441111304 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio0% {JP} 441111307 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio10% {JP} 441111306 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio100% {JP} 441111301 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio25% {JP} 441111305 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio50% {JP} 441111303 U		
truck transportation service, 4t truck, loading ratio75% {JP} 441111302 U		
truck transportation service, business use {JP} 441111000 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
truck transportation service, engine size 660cc-2000cc, business use {JP} 441112000 U		
truck transportation service, engine size 660cc-2000cc, private {JP} 442112000 U		
truck transportation service, engine size less than 660cc, business use {JP} 441114000 U		
truck transportation service, engine size less than 660cc, private {JP} 442114000 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio average {JP} 441114104 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio0% {JP} 441114107 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio10% {JP} 441114106 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio100% {JP} 441114101 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio25% {JP} 441114105 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio50% {JP} 441114103 U		
truck transportation service, light truck, loading ratio75% {JP} 441114102 U		
truck transportation service, light van, loading ratio average {JP} 441112104 U		
truck transportation service, light van, loading ratio0% {JP} 441112107 U		
truck transportation service, light van, loading ratio10% {JP} 441112106 U		
truck transportation service, light van, loading ratio100% {JP} 441112101 U		
truck transportation service, light van, loading ratio25% {JP} 441112105 U		
truck transportation service, light van, loading ratio50% {JP} 441112103 U		
truck transportation service, light van, loading ratio75% {JP} 441112102 U		
truck transportation service, private {JP} 442111000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 45	
coastwise vessel transportation service, cargo {JP} 452211000 U		
coastwise vessel transportation service, cargo, tanker {JP} 452212000 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
coastwise vessel transportation service, passenger {JP} 452111000 U		
ferry transportation service {EU} 452200100 U		
ship transportation service, coal carrier <80kDWT {JP} 451200109 U		
ship transportation service, coal carrier >80kDWT {JP} 451200110 U		
ship transportation service, container ship (chilled and frozen) <4kTEU {JP} 451200113 U		
ship transportation service, container ship (chilled and frozen) >4kTEU {JP} 451200114 U		
ship transportation service, container ship <4kTEU {JP} 451200107 U		
ship transportation service, container ship >4kTEU {JP} 451200108 U		
ship transportation service, crude oil tanker <80kDWT {JP} 451200101 U		
ship transportation service, crude oil tanker >80kDWT {JP} 451200102 U		
ship transportation service, iron ore carrier <80kDWT {JP} 451200111 U		
ship transportation service, iron ore carrier >80kDWT {JP} 451200112 U		
ship transportation service, LNG tanker {JP} 451200100 U		
ship transportation service, oil product tanker <80kDWT {JP} 451200103 U		
ship transportation service, oil product tanker >80kDWT {JP} 451200104 U		
ship transportation service, other bulk carrier <80kDWT {JP} 451200105 U		
ship transportation service, other bulk carrier >80kDWT {JP} 451200106 U		
transportation service by pusher barge, deck barge {JP} 452213000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 46	
air transportation service, cargo, domestic {JP} 462111000 U		
air transportation service, cargo, international {JP} 462112000 U		
air transportation service, passenger, domestic {JP} 461111000 U		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
air transportation service, passenger, international {JP} 461112000 U		
energy, Refuse Derived Fuel (RDF) combustion {JP} 519100803 U		
energy, waste plastics combustion {JP} 519100802 U		
energy, waste tires combustion {JP} 519100801 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 51	
01_planting and logging		
01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations		
02_chipping		
03_transportation		
04_Ethanol Production_Ethanol Production		
04_preliminary grinding		
05_fine grinding		
06_classifying		
06_Ethanol Production_Electricity Cogeneration Credits		
07_I'm Green PE_Ethanol Transport		
08_I'm Green PE_Industrial Operations (Ethylene and PE)	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	新規実装をしたプロセスのため IDEA 製品コードが存在しない。そこで 99 の番号を割り当てた。

上記の基本フローを書き換えたプロセスを作成し、次に二次データを SimaPro へ実装を行った。収集したデータの内、バイオプラスティックを例として実装手順を示す。

3-8-1-2. 二次データの実装例

[Braskem 2017]の文献値は入出力の情報はなく段階別の kgCO₂e/kg の値のみが記載されていた。そこで SimaPro に実装する際には段階別のプロセスを作成し、基本フローの出力を 1 対 1 で接続した。接続例と段階別に接続した基本フローを示す。

Products									
Outputs to technosphere: Products and co-products		Amount	Unit	Quantity	Allocati	Waste type	Category		
01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations		1	kg	Mass	100 %	not defined	00_KeioU...\BioPE		
Add									
Outputs to technosphere: Avoided products			Amount			Unit	Distribution SD		
Add									
Inputs									
Inputs from nature				Sub-compartm Amount			Unit	Distri	
Add									
Inputs from technosphere: materials/fuels				Amount					
Add									
Inputs from technosphere: electricity/heat			Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add									
Outputs									
Emissions to air			Sub-compartment		Amount		Unit	Distribution	SD:
Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3					1		kg	Undefined	
Add									

図 3-20 SimaPro 上の接続例

表 3-24 バイオ PE のプロセス名と基本フローの接続

プロセス名	接続した基本フロー	エネ起	非エネ起
01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	●	
02_Sugarcane Growing_Land Use Change Credits	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified		●
03_Sugarcane Growing_CO2 Uptake	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified		●
04_Ethanol Production_Ethanol Production	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	●	
05_Ethanol Production_Bagasse Burning	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified		●
06_Ethanol Production_Electricity Cogeneration Credits	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	●	
07_I'm Green PE_Ethanol Transport	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	●	
08_I'm Green PE_Industrial Operations (Ethylene and PE)	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	●	

次に 1 対 1 で接続したプロセスをまとめるプロセスを作成し、それぞれのプロセスの投入量に記載された kgCO₂e/kg の値を入力した。

Table 3 shows a contribution analysis for Climate Change impact category:

		kgCO ₂ e/kg
Sugarcane Growing	Agricultural Operations	0,91
	Land Use Change Credits	-1,10
	CO ₂ Uptake	-3,14
		-3,33
Ethanol Production	Ethanol Production	0,03
	Bagasse Burning	0,16
	Electricity Cogeneration Credits	-1,17
		-0,98
I'm green™ PE	Ethanol Transport	0,46
	Industrial Operations (Ethylene and PE)	0,76
		-1,22
		-3,09

Products									
Outputs to technosphere: Products and co-products	Amount	Unit	Quantity	Allocat	Waste type	Category	Comment		
BioPE(Braskem NewRelease)	1	kg	Mass	100 %	not defined	00_KeioU...BioPE			
Add									
Outputs to technosphere: Avoided products	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max			
Add									
Inputs									
Inputs from nature	Sub-compart	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max		
Add									
Inputs from technosphere: materials/fuels									
01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations		0,91	kg	Undefined					
02_Sugarcane Growing_Land Use Change Credits		-1,1	kg	Undefined					
03_Sugarcane Growing_CO2 Uptake		-3,14	kg	Undefined					
04_Ethanol Production_Ethanol Production		0,03	kg	Undefined					
05_Ethanol Production_Bagasse Burning		0,16	kg	Undefined					
06_Ethanol Production_Electricity Cogeneration Credits		-1,17	kg	Undefined					
07_I'm Green PE_Ethanol Transport		0,46	kg	Undefined					
08_I'm Green PE_Industrial Operations (Ethylene and PE)		0,76	kg	Undefined					
Add									
Inputs from technosphere: electricity/heat									
Add									

図 3-21 バイオ PE の実装

このようにしてバイオ PE のプロセスを実装した。上記の手順で添加剤についても実装を行った。

3-8-1-3. 算定用手法の作成

使用した IDEAv2 データベースにはエネルギー起源と非エネルギー起源を計算する手法が実装されておらず、今回の算定に当たって作成した。ベースとしたのは IPCC 2013 GWP の手法で、対象となっている基本フローをエネルギー起源と非エネルギー起源に分割した。エネルギー起源には前述をした基本フローのみとし、非エネルギー起源はそれ以外の基本フローとした。以下に作成した手法の対応する基本フローと係数を示す。

表 3-25 実装したエネ起、非エネ起の手法

カテゴリ名	基本フロー	特性化 係数	単位
01_エネ起 CO2 (IPCC 2013)	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 05	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 17	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 18	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 33	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 34	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 42	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 43	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 44	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 45	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 46	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 51	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-1	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-2	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 99-3	1	kg CO2 e / kg
02_非エネ起 CO2 (IPCC 2013)	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, carbon dioxide, air, unspecified	1	kg CO2 e / kg
	Emissions, methane (biogenic), air, unspecified	28	kg CO2 e / kg
	Emissions, methane, air, unspecified	28	kg CO2 e / kg
	Emissions, methane (fossil), air, unspecified	30	kg CO2 e / kg
	Emissions, nitrous oxide, air, unspecified	265	kg CO2 e / kg
	Emissions, HCFC-141b, air, unspecified	782	kg CO2 e / kg
	Emissions, HFC-134a, air, unspecified	1300	kg CO2 e / kg
	Emissions, HCFC-22, air, unspecified	1760	kg CO2 e / kg
	Emissions, CFC-11, air, unspecified	4660	kg CO2 e / kg

カテゴリ名	基本フロー	特性化 係数	単位
	Emissions, PFC-14, air, unspecified	6630	kg CO2 e / kg
	Emissions, CFC-12, air, unspecified	10200	kg CO2 e / kg
	Emissions, PFC-116, air, unspecified	11100	kg CO2 e / kg
	Emissions, sulfur hexafluoride, air, unspecified	23500	kg CO2 e / kg

またこれらの特性化係数を1つにまとめたGHGという手法も作成した。GHGの手法については上記のエネルギー起源と非エネルギー起源を合わせた手法のため掲載は割愛する。

3-8-2. バックグラウンドデータとのマッピング

収集したインベントリ及び前提条件を用いて SimaPro に実装を行った。SimaPro に入力した名称と接続がされている IDEA の関係性を以下に示す。なお以下の表で IDEA 接続先および備考が青に塗られているプロセスは同プロセスを回避する、控除として入力されている。緑は出力される物質として計上される基本フローである。

3-8-2-1. 従来型の IDEA マッピング

表 3-26 従来型の IDEA マッピング結果表

ベースライン (従来製品製法)	単位	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00B_00_従来製品	p	00B_00_Conventional Products		以下の 00B_01~09 までを内包し ている
00B_01_PP+PE の製造	kg	00B_01_PP+PE Production	polypropylene {JP} 173518000 U polyethylene {JP} 173516000 U BioPE(Braskem NewsRelease)	BioPE はバイ オベースの シナリオ算定 用に接続し ている。各投 入量はパラメ ータで管理し ている。
00B_02_PP+PE の輸送	tkm	00B_02_PP+PE Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U ship transportation service, container ship <4kTEU {JP} 451200107 U	それぞれ海 外陸上、国 際海運、国 内陸送用で

ベースライン (従来製品製法)	単位	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
			truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	ある。
00B_03-A_椅子の成型加工	kWh	00B_03-A_Molding of Chair	electricity, Italy, IEA, 2011 {IT} 332064011 U	ヒアリングよりイタリア生産
00B_03-B_成型加工機械	p	00B_03-B_Machine use	iron castings for machinery {JP} 235111000 U	
00B_03-C_金形	p	00B_03-C_Mold use	00B_03-D MoldProduction	金型製造プロセスを作成し接続
00B_03-D_金形製造	p	00B_03-D MoldProduction	regenerated aluminium and aluminium alloys {JP} 242311000 U	金型は中国生産とした
			forgings from billets and bars, 4 digit {JP} 235400000 U	
			electricity, PR of China, IEA, 2011 {CN} 332106011 U	
			industrial waste treatment service, waste metal {JP} 852200212 U	
00B_04_加工ロス	kg	00B_04_Processing Loss	volume reduction of used miscellaneous plastic, bale and fluff {JP} 511100214 U	
00B_05_椅子の輸送	tkm	00B_05_Chair Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
			ship transportation service, container ship <4kTEU {JP} 451200107 U	
			truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
00B_06_加工ロスの輸送	tkm	00B_06_Transportation of processing loss	truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U	

ベースライン (従来製品製法)	単位	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00B_07_椅子の使用	p	00B_07_Use of the chair		
00B_08_椅子の回収	tkm	00B_08_Waste Chair Transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio 75% {JP} 44111202 U	
			volume reduction of used miscellaneous plastic, bale and fluff {JP} 511100214 U	
00B_09_椅子の焼却	kg	00B_09_Incineration of Chair	incineration service, domestic waste, waste plastics, waste polyolefin (PE,PP) {JP} 851612203 U	
			intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
00B_10_椅子のマテリアルリサイクル	kg	00B_10-1_01_Chair MR Horizontal_Raw material substitution	polypropylene {JP} 173518000 U	代替先選択 Outputs to technosphere: Avoid products
			polyethylene {JP} 173516000 U	
			BioPE(Braskem NewsRelease)	
	kg	00B_10-1_02_Chair MR Horizontal_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	kg	00B_10-1_03_Chair MR Horizontal_Pellet production	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	
	kg	00B_10-1_04_Chair MR Horizontal_transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio 75% {JP} 44111202 U	
	kg	00B_10-2_01_Chair MR Lower_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	kg	00B_10-2_02_Chair MR	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	

ベースライン (従来製品製法)	単位	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
		Lower_Pelletizing		
00B_11_椅子のサーマルリサイクル	kg	00B_11-1-01_Chair TR_Substitute	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	代替先選択 Outputs to technosphere: Avoid products
			energy, heavy fuel oil C combustion {JP} 181118801 U	
			pulp mill craft pulp production energy mix {JP} 151112000 fix U	
			energy, liquefied natural gas (LNG) combustion {JP} 052112802 U	
	kg	00B_11-1-02_Chair TR_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	kg	00B_11-1-03_Chair TR_RPF conversion	refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) from polyvinyl chloride (PVC) contained within plastics {JP} 519100204 U	
	kg	00B_11-1-04_Chair TR_Direct emission	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified	Emission to air
00B_12_椅子の埋立	kg	00B_12_Landfill of Chair	landfill treatment service, domestic waste, waste plastics {JP} 851611201 U	
			intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
00B_13_金型の廃棄	p	00B_13_mold waste	industrial waste treatment service, waste metal {JP} 852200212 U	

3-8-2-2. 3DプリンタのIDEA マッピング

表 3-27 3D プリンタの IDEA マッピング結果表

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00A_00_3D プリント製品	00A_00_3D Print Products		以下の 00A_01~14 ま でを内包している
00A_01_PE の製造	00A_01_PE Production	BioPE(Braskem NewsRelease)	ポリエチレンは石油ベ ースのシナリオ算定用 に接続している。各投 入量はパラメータで管 理している。
00A_02_添加剤の製造	00A_02_Additives Production	polyethylene {JP} 173516000 U Cellulose fiber	
00A_01_03_PE+添加剤の混錬	00A_01_03_Mixing_PE+Additives	00A_01_PE Production 00A_02_Additives Production 00A_01_04_MixingLoss_Transpor t 00A_01_05_MixingLoss_Incinerati on 00A_03_PE Transport 00A_04_Additives Transport	作成したプロセスを投 入
		electricity, Japan, 2015 {JP} 331111015 U	混錬用電力の投入

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00A_01_04_混錬ロスの輸送	00A_01_04_MixingLoss_Transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U	
00A_01_04_混錬ロスの焼却	00A_01_05_MixingLoss_Incineration	incineration service, domestic waste, waste plastics, waste polyolefin (PE,PP) {JP} 851612203 U	PE 分の燃焼
		incineration treatment service, industrial waste, waste paper and wood waste {JP} 852212232 U	ファイラーの燃焼
00A_03_PE の輸送	00A_03_PE Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
		ship transportation service, container ship <4kTEU {JP} 451200107 U	
		truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
00A_04_添加剤の輸送	00A_04_Additives Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
00A_05-A_椅子の 3D プリント	00A_05-A_3D Print of Chair	electricity, Japan, 2015 {JP} 331111015 U	
00A_05-B_3D プリンター	00A_05-B_3D Printer	iron castings for machinery {JP} 235111000 U	
00A_06_加工ロス	00A_06_Processing Loss	volume reduction of used miscellaneous plastic, bale and fluff	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
		{JP} 511100214 U	
00A_07_椅子の輸送	00A_07_Chair Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio75% {JP} 441111402 U	
00A_08_加工ロスの輸送	00A_08_Transportation of processing loss	truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U	
00A_09_椅子の使用	00A_09_Use of the chair		
00A_10_椅子の回収	00A_10_Waste Chair Transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U	
		volume reduction of used miscellaneous plastic, bale and fluff {JP} 511100214 U	
00A_11-1_椅子の焼却	00A_11-1_Incineration of Chair	incineration service, domestic waste, waste plastics, waste polyolefin (PE,PP) {JP} 851612203 U	
		intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
00A_11-2_焼却灰の輸送	00A_11-2_Incineration ash transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio75% {JP} 441111202 U	
00A_11-3_焼却灰の埋立	00A_11-3_Incineration ash landfill	landfill treatment service, industrial wastes {JP} 852211000 U	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00A_12_椅子のマテリアルリサイクル	00A_12-01_Chair MR Horizontal_Raw material substitution	00A_01_PE Production	Outputs to technosphere: Avoid products
		00A_02_Additives Production	Outputs to technosphere: Avoid products
	00A_12-02_Chair MR Horizontal_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	00A_12-03_Chair MR Horizontal_Pellet production	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	
	00A_12-04_Chair MR Horizontal_transport	truck transportation service, 2t truck, loading ratio 75% {JP} 441111202 U	
00A_13_椅子のサーマテリアルリサイクル	00A_13-1-01_Chair TR_Coal substitute	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	代替先選択 Outputs to technosphere: Avoid products
		energy, heavy fuel oil C combustion {JP} 181118801 U	
		pulp mill craft pulp production energy mix {JP} 151112000 fix U	
		energy, liquefied natural gas (LNG) combustion {JP} 052112802 U	
	00A_13-1-02_Chair TR_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
	00A_13-1-03_Chair TR_RPF conversion	refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) from polyvinyl chloride (PVC) contained within plastics {JP} 519100204 U	
	00A_13-1-04_Chair TR_Direct emission	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified	Emission to air
	00A_13-2_Chair TR_Landfill	landfill treatment service, industrial wastes {JP} 852211000 U	
	00A_13-3-01_Chair TR Additive only_Substitute	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	代替先選択 Outputs to technosphere: Avoid products
		energy, heavy fuel oil C combustion {JP} 181118801 U	
		pulp mill craft pulp production energy mix {JP} 151112000 fix U	
		energy, liquefied natural gas (LNG) combustion {JP} 052112802 U	
	00A_13-3-02_Chair TR Additive only_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	00A_13-3-03_Chair TR Additive only_RPF conversion	refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) from polyvinyl chloride (PVC) contained within plastics {JP} 519100204 U	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00A_14_椅子の埋立	00A_14_Landfill of Chair	landfill treatment service, domestic waste, waste plastics {JP} 851611201 U	
		intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	

3-8-2-3. 実装結果

SimaPro に実装した結果を一部抜粋して示す。

テクノスフィアへのアウトプット。製品および副産物	量	単位	数量	パーセント	廃棄物タイプ	カテゴリ
00B_11_Chair TR	1	kg	Mass	100 %	未定義	...\00B_
(ここに挿入)						
テクノスフィアへのアウトプット。回避された製品	量	単位	分布	SD^2 又は		
energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	41*BF_PPMix = 38.9	MJ				
energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	37.1*BF_PEMix = 1.86	MJ				
(ここに挿入)						
インプット						
自然（資源）からの入力	サポコンバートメント	量	単位	分布	SD^2 又は	最小 最大
(ここに挿入)						
テクノスフィア（材料/燃料）からの入力	量	単位	分布	SD^2 又は	最小	最大
refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) from polyvinyl chloride (PVC) co	1	kg	未定義			
intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512	1	kg	未定義			
(ここに挿入)						
テクノスフィア（電力/熱）からの入力	量	単位	分布			
(ここに挿入)						
アウトプット						
大気への排出	サポコンバートメント	量	単位	分布	SD^2 又は	最小 最大
Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified		3.14	kg	未定義		
(ここに挿入)						

図 3-22 00B_11_椅子のサーマルリサイクルの実装例

テクノスフィアへのアウトプット、回避された製品に控除された石炭の燃焼プロセスが計上されており、これはサーマルリサイクルを行うことによって石炭の投入を代替したためである。この時の PP と PE の燃焼エネルギーは [Earth Engineering Center City College of New York 2016]から引用し、製品の樹脂構成割合を掛け合わせ投入量と合致するようにした。

次に椅子の従来型と 3D プリントの実装結果を示す。

Outputs to technosphere: Products and co-products		量	単位	数量	パーセント
00B_00_Conventional Products		1	p	Amount	100 %
Add					
Outputs to technosphere: Avoided products		量			
Add					
Inputs					
自然（資源）からの入力		サポコバメント	量		
Add					
Inputs from technosphere: materials/fuels		量	単位		
00B_01_PP+PE Production	$BF_Weight/(1-BF_LossWeightPer) = 10.5$		kg		
00B_02_PP+PE Transport	$BF_Weight/(1-BF_LossWeightPer)-(BF_Weight*BF_MRPer) = 9.03$		kg		
00B_03-A_Molding of Chair	$BF_Weight = 10$		kg		
00B_03-B_Machine use	1		p		
00B_03-C_Mold use	1		p		
00B_04_Processing Loss	$BF_Weight/(1-BF_LossWeightPer)-BF_Weight = 0.526$		kg		
00B_05_Chair Transport	$BF_Weight = 10$		kg		
00B_06_Transportation of processing loss	$BF_Weight/(1-BF_LossWeightPer)-BF_Weight = 0.526$		kg		
00B_07_Use of the chair	0		p		
00B_08_Waste Chair Transport	$BF_Weight = 10$		kg		
00B_09_Incineration of Chair	$BF_Weight*BF_InPer+min_PER = 1E-8$		kg		
00B_10_Chair MR Lower	0		kg		
00B_10-1_01_Chair MR Horizontal_Raw material substitution	$BF_Weight*BF_RPer*BF_MRPer+min_PER = 1.5$		kg		
00B_10-1_02_Chair MR Horizontal_Crushing	$BF_Weight*BF_RPer*BF_MRPer+min_PER = 1.5$		kg		
00B_10-1_03_Chair MR Horizontal_Pellet production	$BF_Weight*BF_RPer*BF_MRPer+min_PER = 1.5$		kg		
00B_10-1_04_Chair MR Horizontal_transport	$BF_Weight*BF_RPer*BF_MRPer+min_PER = 1.5$		kg		
00B_10-2_01_Chair MR Lower_Crushing	0		kg		
00B_10-2_02_Chair MR Lower_Pelletizing	0		kg		
00B_11_Chair TR	0		kg		
00B_11-1-01_Chair TR_Substitute	$BF_Weight*BF_RPer*BF_TRPer*BF_TR_include_yn+min_PER = 8.5$		kg		
00B_11-1-02_Chair TR_Crushing	$BF_Weight*BF_RPer*BF_TRPer*BF_TR_include_yn+min_PER = 8.5$		kg		
00B_11-1-03_Chair TR_RPF conversion	$BF_Weight*BF_RPer*BF_TRPer*BF_TR_include_yn+min_PER = 8.5$		kg		
00B_11-1-04_Chair TR_Direct emission	$BF_Weight*BF_RPer*BF_TRPer*BF_TR_include_yn+min_PER = 8.5$		kg		
00B_12_Landfill of Chair	$BF_Weight*BF_LPer+min_PER = 1E-8$		kg		
00B_13_mold waste	1		p		

図 3-23 従来型の実装結果

Outputs to technosphere: Products and co-products	量	単位	数量	パーセント	廃棄物タイプ	カテゴリ	コメント
00A_00_3D Print Products_v2	1	p	Amount	100 %		...00A_After_Prod	
Add							
Outputs to technosphere: Avoided products	量	単位	分布				
Add							
Inputs							
自然（資源）からの入力	量	単位	分布				SD^2 又は 2.1
Add							
Inputs from technosphere: materials/fuels	量	単位					
00A_01_PE Production	0	kg					
00A_02_Additives Production	0	kg					
00A_01_03_Mixing_PE+Additives	$(AF_PEWeight + AF_Additive) * (1 + AF_LossWeightPer) = 10$	kg					
00A_03_PE Transport	$AF_PEWeight * (1 + AF_LossWeightPer) * (1 - AF_MRPer) = 5.95$	kg					
00A_04_Additives Transport	$AF_Additive * (1 + AF_LossWeightPer) * (1 - AF_MRPer) = 2.55$	kg					
00A_05-A_3D Print of Chair	$AF_Weight = 10$	kg					
00A_05-B_3D Printer	1	p					
00A_06_Processing Loss	$AF_Weight * AF_LossWeightPer = 0$	kg					
00A_07_Chair Transport	$AF_Weight = 10$	kg					
00A_08_Transportation of processing loss	0	kg					
00A_09_Use of the chair	0	p					
00A_10_Waste Chair Transport	$AF_Weight = 10$	kg					
00A_11-1_Incineration of Chair	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_InPer + min_PER = 1E-8$	kg					
00A_11-2_Incineration ash transport	$AF_AdScenario4 * AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_InPer + min_PER = 1E-8$	kg					
00A_11-3_Incineration ash landfill	$AF_AdScenario4 * AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_InPer + min_PER = 1E-8$	kg					
00A_12_Chair MR Horizontal	0	kg					
00A_12-01_Chair MR Horizontal_Raw material substitution	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_MRPer * AF_MRPer_H + min_PER = 1.5$	kg					
00A_12-02_Chair MR Horizontal_Crushing	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_MRPer * AF_MRPer_H + min_PER = 1.5$	kg					
00A_12-03_Chair MR Horizontal_Pellet production	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_MRPer * AF_MRPer_H + min_PER = 1.5$	kg					
00A_12-04_Chair MR Horizontal_transport	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_MRPer * AF_MRPer_H + min_PER = 1.5$	kg					
00A_12_Chair MR Lower	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_MRPer * AF_MRPer_S + min_PER = 1E-8$	kg					
00A_13-1_Chair TR	0	kg					
00A_13-1-01_Chair TR_Substitute	$AF_PEWeight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 5.95$	kg					
00A_13-1-02_Chair TR_Crushing	$AF_PEWeight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 5.95$	kg					
00A_13-1-03_Chair TR_RPF conversion	$AF_PEWeight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 5.95$	kg					
00A_13-1-04_Chair TR_Direct emission	$AF_PEWeight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 5.95$	kg					
00A_13-2_Chair TR_Landfill	$AF_Additive_TR_ashRatio * AF_Additive * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 0.263$	kg					
00A_13-3_Chair TR Additive only	0	kg					
00A_13-3-01_Chair TR Additive only_Substitute	$AF_Additive * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 2.55$	kg					
00A_13-3-02_Chair TR Additive only_Crushing	$AF_Additive * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 2.55$	kg					
00A_13-3-03_Chair TR Additive only_RPF conversion	$AF_Additive * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_RPer * AF_TRPer * AF_TR_include_yn + min_PER = 2.55$	kg					
00A_14_Landfill of Chair	$AF_Weight * (1 + AF_LossWeightPer) * AF_LPer + min_PER = 1E-8$	kg					

図 3-24 3D プリンタの実装結果

SimaPro 上で設定しているパラメータの一覧を下記に示す。

表 3-28 パラメーター一覧

パラメータ名	値	備考
BF_Weight	10	Product Weight(kg) 仕上がり製品重量
AF_Weight	10	Product Weight(kg) 仕上がり製品重量
BF_PPMix	0.95	PlasticsMix(%) PP の割合
BF_PEMix	0.05	PlasticsMix(%) PE の割合
BF_LossWeightPer	0.05	Percentage(%) 製造ロス率 0.01=1%
AF_LossWeightPer	0	Percentage(%) 製造ロス率 0.01=1%
AF_MixingLoss	0.05	Percentage(%) 混練ロス率 0.01=1%
BF_AdditivePer	0	Additive Percentage(%) 添加剤の投入割合 0.01=1%

パラメータ名	値	備考
AF_AdditivePer	0.3	Additive Percentage(%) 添加剤の投入割合 0.01=1%
BF_Electricity	2.747252747	Consumption Electricity(kWh) 1kg あたりの消費電力(回転成形)
BF_OSLand	50	Kilometer(km) 原料 海外陸上輸送 バイオ PE の場合ブラジル国内 50km
AF_OSLand	50	Kilometer(km) 原料 海外陸上輸送 50km
BF_Marine	10500	Kilometer(km) 原料 海上船舶輸送 バイオ PE の場合ブラジル→イタリア
AF_Marine	22000	Kilometer(km) 原料 海上船舶輸送 22000km
BF_Domestic	50	Kilometer(km) 原料 国内陸上輸送 50km
AF_Domestic	50	Kilometer(km) 原料 国内陸上輸送 50km
BF_OSLandProduct	500	Kilometer(km) 製品 海外陸上輸送 500km
AF_OSLandProduct	0	Kilometer(km) 製品 海外陸上輸送
BF_MarineProduct	18000	Kilometer(km) 製品 海上船舶輸送 18000km
AF_MarineProduct	0	Kilometer(km) 製品 海上船舶輸送
BF_DProduct	500	Kilometer(km) 製品 国内陸上輸送 500km
AF_DProduct	100	Kilometer(km) 製品 国内陸上輸送 100km
BF_DLossWeight	50	Kilometer(km) 加工ロス廃棄 国内輸送 50km
AF_DLossWeight	50	Kilometer(km) 加工ロス廃棄 国内輸送 50km
BF_DProductRecovery	50	Kilometer(km) マテリアルリサイクル 国内輸送 50km
AF_DProductRecovery	50	Kilometer(km) マテリアルリサイクル 国内輸送 50km
BF_RPer	1	Percentage(%) 廃棄量のリサイクル割合 1=100%
AF_RPer	1	Percentage(%) 廃棄量のリサイクル割合 1=100%
BF_LPer	0	Percentage(%) 廃棄量の埋立割合 0=0%
AF_LPer	0	Percentage(%) 廃棄量の埋立割合 0=0%
BF_InPer	0	Percentage(%) 廃棄量の焼却割合 0=0%
AF_InPer	0	Percentage(%) 廃棄量の焼却割合 0=0%
BF_MRPer	0.15	Percentage(%) リサイクル割合のマテリアルリサイクル割合 0.15=15%
AF_MRPer	0.15	Percentage(%) リサイクル割合のマテリアルリサイクル割合 0.15=15%
BF_TRPer	0.85	Percentage(%) リサイクル割合のサーマルリサイクル割合 0.85=85%

パラメータ名	値	備考
AF_TRPer	0.85	Percentage(%) リサイクル割合のサーマルリサイクル割合 0.85=85%
BF_Mold_weight	50.8912843	Mold Weight(kg) 金型の質量 従来製品用
BF_Mold_usecount	300	Mold Usecount(time) 金型の使用回数 従来製品用
AF_Mold_weight	0	Mold Weight(kg) 金型の質量 3D プリント用
BF_Machine_weight	50000	Machine Weight(kg) 製造機械の質量 従来製品用
AF_Machine_weight	1000	Machine Weight(kg) 製造機械の質量 3D プリント用
BF_MatLifetime	50	Count 機械の寿命 従来製品用
AF_MatLifetime	5	Count 機械の寿命 3D プリント用
BF_yearProduction	10000	Count 機械の年間生産数 従来製品用
AF_yearProduction	365	Count 機械の年間生産数 3D プリント用
AF_MRPer_H	1	Percentage(%) リサイクル割合のマテリアルリサイクル割合 の内水平リサイクル分 1=100%
AF_MRPer_S	0	Percentage(%) リサイクル割合のマテリアルリサイクル割合 の内カスケードリサイクル分 0=0%
AF_Voltage	200	Voltage(V) 3D プリントの定格
AF_Ampere	60	Ampere(A) 3D プリントの定格
AF_tatamiW_1	0.4	Consumption Electricity(kW) 3D プリントの電力 Tatami の実測値(最初の初期起動)
AF_TatamiW_2	0.4	Consumption Electricity(kW) 3D プリントの電力 Tatami の実測値(稼働中)
AF_Hour_1	0	Hour(h) 3D プリントで1個印刷するにあたってかかる時間 (最初の初期起動)
AF_Hour_2	4	Hour(h) 3D プリントで1個印刷するにあたってかかる時間 (稼働中)
AF_CNF_IncRat	0.103	添加剤の物質の設定に利用 セルロースファイバーを利用 紙の灰分とし文献より抽出
AF_CF_MJ	12.05	セルロースファイバーを使う際の燃焼(MJ/kg) 紙の低位 発熱量を利用した。乾燥と湿潤で変わるため中間値の(94 00+14700)/2=12050KJ/kg を利用した。 http://www.oit.ac.jp/env/cardamom/~wastcoex/Elem_Behav_MSWI/Typical%20value%20of%20waste%20constituents,%20doboku%20gakkai.pdf
BF_BioPE_Use	0	従来型でバイオ PE を利用する場合 1=利用する 0=利用 しない
AF_BioPE_Use	1	3D プリントでバイオ PE を使用する場合 1=利用する 0= 利用しない

パラメータ名	値	備考
BF_IT	1	従来品_生産国指定 1=イタリア
BF_JP	0	従来品_生産国指定 1=日本
AF_CoalSub	1	3D プリンタ RPF による石炭代替 0=なし 1=あり
BF_CoalSub	1	従来品 石炭代替 0=なし 1=あり
BF_LT_Production	$BF_MatLifeTime * BF_yearProduction$	Count 生涯生産数
AF_LT_Production	$AF_MatLifeTime * AF_yearProduction$	Count 生涯生産数
BF_PEWeight	$BF_Weight - BF_Additive$	PE weight(kg) 素材 PE の質量
AF_PEWeight	$AF_Weight - AF_Additive$	PE weight(kg) 素材 PE の質量
AF_Electricity	$(AF_tatamikW_1 * AF_Hour_1) + (AF_tatamikW_2 * AF_Hour_2)$	Consumption Electricity(kWh) 3D プリンタでの出力 1 個あたりの消費電力
BF_Additive	$BF_Weight * BF_AdditivePer$	Additive weight(kg) 添加剤重量
AF_Additive	$AF_Weight * AF_AdditivePer$	Additive weight(kg) 添加剤重量

