

令和元年度 環境省委託業務

令和元年度 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2年3月

学校法人慶應義塾

令和元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

Braskem 社製造のグリーン・ポリエチレン(バイオ PE) 単体 5 種の評価実験により、溶融積層造形(FDM)に適する溶融粘度(MFR)および家具製品製造精度に関与する収縮率の小さなグレードを選定し、収縮抑制効果を有するバイオマス由来のフィラーとしてセルロース・ナノ・ファイバー(CNF)「変成セルロース」4 種と、繊維が長めのセルロース・ファイバーおよび針葉樹綿・木紛など合計 10 種を配合したコンパウンド・ペレットを試作し、専用の小型 3D プリンタにより収縮性・層間融着力等 3D プリント適合性の評価実験を行った。

セルロース・ナノ・ファイバーの配合は収縮性抑止により効果が見られたが、フィラー溶融による褐色の変色があり、また混練配合の不均一性による脆さが見られた。セルロース・ファイバーや樹綿・木紛では、収縮抑制の効果は認められたが、フィラーが凝集する現象が見られた。フィラーの選定とそれに伴う混練方法の改善が課題となる。

また今回は、家具製造を目的としているので、紫外線吸収剤、光安定剤の添加による耐候性能の向上とその検証の計画検討を行った。

次年度は、3D プリントに適合するフィラーの選択と混練方法の追求に加え、バイオ PE 単体およびコンパウンドの物性(耐候性、耐久性)の確認と、家具安全規格との適合性の確認、バイオ PE コンパウンド・ペレットの再生・性能劣化の実証実験を計画している。

2. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験

市販ポリエチレン製並びにこれに類する樹脂製の屋外型椅子製品 50 脚の形状調査を行い、3D プリント造形条件の観点から 38 脚を選択した。これらに椅子形状の設計ツールを利用して 3D プリント向けの形状調整を施して、専用の大型 3D プリンタにおける積層方向、ノズル径、溶融温度および造形速度の設定などの造形条件を定め、22 脚の実寸椅子を製造した。造形素材は、植物由来のプラスチック PLA(ポリ乳酸)ペレットを利用した。

本年度は、3D プリントによる椅子形状の可能性を見るための実験であったが、家具製造専門家により検証を行ったところ、

- ・ 塞がってほしい面の形成が 3D プリントの制約で実現できない
- ・ 素材が硬質なため座り心地に直結する座面、背面に形成するカーブが重要となる。それが 3D

プリント形態形成の制約なのか、設計力で補えるのか、さらなる実験が必要などの課題指摘とともに、

- ・ 表面の仕上がり感が想定よりも美しく、特有の個性となっている。
- ・ クッション性やスライドなど動きを生み出す構造に注目出来る

など新たな可能性も見いだされ、3D プリンティング技術の特性を活かしたデザインを検討し、製造要件を固めていくことが必要であるとの結論になった。

次年度にはバイオ PE コンパウンドを材料とし、3D プリント製造の特徴を活かした椅子の設計および「個別カスタマイズ」設計手法の開発による製造実証実験と、完成した椅子の強度、耐久性、耐候性などの実用性検証を行う計画である。

3. LCA の検証・評価

現存家具業界のビジネスモデルに基づく製造方式と、バイオ PE とバイオマス由来のフィラーのコンパウンドを材料とする3Dプリント製造方式を比較する LCA モデルを作成し、家具市場・流通・生産実態・リサイクル調査、3D 製造技術調査および配合フィラー等にもとづく 15 項目の前提条件による GHG 排出量、エネ起・非エネ起 CO₂ 削減量を算定し、将来試算を行った。

バイオポリエチレンで 3D プリントで製造した場合と、従来のプラスチック (PP 製が 95%, PE 製は 5%) で回転成型で製造した場合の 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。また、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。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ていた。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。

フィラーを変更した感度分析結果では、事業開始当初に基準とした CNF よりもその他のフィラーを用いた結果の方が合計 GHG 排出量は小さくなり、エネルギー起源についても従来型と比較しても削減される結果となった。

本年度の実証実験、調査に基づく CO₂ 削減量は、事業終了時点でエネ起 2t-CO₂、非エネ起 6t-CO₂、2030 年時点でエネ起 166t-CO₂、非エネ起 645t-CO₂ と算定された。

次年度には、従来品の製造一次データ、成形に用いられる金型の製造データと金型あたりの生産量データの収集、フィラーの製造データの収集によりプロセスの精緻化、感度向上を行う。廃棄・リサイクル実態調査と 3D プリンタで代替する椅子の具体像、ビジネスモデル、リサイクルシナリオの検討結果を LCA モデルへ反映させる。ペレット再生・性能劣化の実験結果をもとにマテリアル・リサイクルの検証を行う。

4. 3D プリントによる個別化屋外型家具に関する市場調査

プラスチック製屋外型家具の参入企業、市場規模などの市場調査および屋外型家具の国内製造販売企業における製品種、生産量、成型方法、原料、製造エネルギー量、素材調達、梱包、加工ロスと処理 廃棄・リサイクルなどの生産実態調査を行い LCA の検証・評価の基礎データとした。

市場調査では、国内で販売されている屋外型家具の大半がポリプロピレン (PP) 素材の射出成形品で、販売台数 24 万台、総重量 850 トン、金額 20 億円 (2018)、主な製造国イタリアからの輸入品が国内販売の金額ベースで 83%、残り 17% の国内の製造は大手 2 社で販売金額の 6 割を占めることがわかった。

その国内製造販売企業 2 社の生産実態調査からは、取り扱う屋外型家具製品はいずれも PP 素材で、射出成形機によって製造されており、椅子やテーブル一体成形に用いられる大型の射出成形機の型締力はおおよそ 1,000t~1,600t、金型のショット数は、サイズや重量によって異なるが 2 万から 10 万回程度であることがわかった。

PE 製屋外型家具海外製品の多くは回転成形機によるものとされており、次年度には、金型成形の実態調査をさらに進めて LCA 評価の精度を高め、バイオ PE 製 3D プリント家具のライフサイクルおよび製品ビジネスモデルの検討により、市場性検証の方法を見いだす計画である。

総括: ポリエチレン (PE) からバイオ PE への移行の最大の課題は、その価格 (およそ 2 倍) である。当初はこの課題を克服すべく 3D プリントで材料消費を半分にすることを検討していたが、既存の椅子が回転成型により十分に薄肉化されていることが調査により判明し、3D プリントであってもこれ以上の材料削減の余地がなく、この方向性は修正せざるを得ないと判断した。ただ、3D プリントでは、金型製造過程が無くなるためにコストカットが生じるため、ある一定個数以下の製造であればコストメリットが生まれることが判明した。工業用部品ではそれはおよそ 450 個という調査結果が複数上がっている。椅子の場合における、分水嶺となる数字は調査しなければいけないが、「ある個数以下」であれば、たとえ 2 倍の価格となるバイオ PE を利用したとしても、コストが見合うポイントは存在するはずである。また、椅子は、工業製品や容器と異なり、材料価格が直に販売価格に結びつくとは限らず、デザイン料などの複雑な計算式によって販売価格が決まる。今回の 3D プリント椅子では、「カスタマイズ」という別の付加価値をつけることもできる。これらの要素を統合し、バイオ PE への移行を進めていく。

その中で本研究プロジェクトの最大の課題は、移行に伴う各種トレード・オフのモデル化と最適化である。大きく分けてそれは 2 つあり、第 1 は、フィラー選択にかかわるトレード・オフ (価格、GHG、リサイクル性)、第 2 は 3D プリント生産にまつわる各ファクターにかかわるトレード・オフ (「生産スピード」「品質 (耐久性)」「ノズル径と材料吐出幅」「個数と納期」) である。2 年目以降はこれらのトレード・オフをモデル化して戦略を定め、諸条件をトータルでクリアする道筋を発見したうえで、適切な移行のシナリオを構築する。

Biopolyethylene Furniture 3D Print Manufacturing Demonstration Project Results Report 2019, 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

Through conducting assessment experiments on five types of green polyethylene (bio PE) manufactured by Braskem S.A., the grade with melt flow rate (MFR) suited to fused deposition modeling (FDM) and small contraction rate pertaining to precision of furniture manufacture was selected; prototype compound pellets were made by mixing together four types of cellulose nanofiber (CNF) “modified cellulose” and 10 types of long-fiber cellulose fibers, conifer cotton, wood powder, etc. as a biomass-derived filler possessing a contraction limiting effect; and a dedicated small-size 3D printer was used to evaluate suitability for 3D printing in terms of contraction characteristics, interlaminar adhesion, etc.

The cellulose nanofiber mixture displayed good effects in terms of contraction limitation, however, melting of the filler caused brown discoloration and there was also brittleness arising from unevenness of the kneaded mixture. The cellulose fibers, conifer cotton and wood powder displayed effects in terms of contraction limitation, however, an agglutination phenomenon was observed in the filler. Issues exist regarding the filler selection and kneading method.

Also, since this experiment was intended to manufacture furniture, planning and examination were conducted to enhance and verify weather resistance performance based on addition of ultraviolet absorbing agent and light stabilizer.

In the next fiscal year, it is planned to investigate filler selection and kneading methods that are suited to 3D printing, ascertain the physical properties (weather resistance and durability) of isolated bio PE and bio PE compounds, confirm compatibility with furniture safety standards, and conduct demonstration experiments on regeneration and performance deterioration of bio PE compound pellets.

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

Upon surveying the shapes of 50 outdoor chairs made from commercially available polyethylene and similar resins, 38 chairs were selected from the viewpoint of 3D print molding conditions. Using a chair shape design tool, these shapes were adjusted for 3D printing; the molding conditions such as laminating direction, nozzle diameter, melt temperature, molding speed, etc. in a dedicated large 3D printer were set, and 22 chairs of full-scale dimensions were manufactured. Plant-derived plastic PLA (polylactic acid) pellets were used as the molding material.

This fiscal year’s experiments were intended to investigate the potential for realizing a chair shape through 3D printing, however, following verification by an expert, issues were pointed out, such as the following:

- Molding of surfaces that it is preferable to close could not be realized due to the limitations of 3D printing.
- Due to the hardness of the material, the curves that are shaped on the seat and backrest, which are directly linked to sitting comfort, are important. Further experimentation is needed to determine whether that is a constraint of 3D print molding or something that can be augmented through design.

In addition, new possibilities were revealed, such as follows:

- The surface finish was more beautiful than expected and presented a distinct uniqueness.
- Attention can be directed to structure that imparts cushion characteristics, sliding and other movements.

Hence, it was concluded that it is necessary to examine designs that leverage the characteristics of 3D printing technology, and establish the requirements for manufacturing.

In the next fiscal year, it is planned to conduct demonstration experiments on manufacturing based on development of chair design and “individual customization” design techniques that leverage the characteristics of 3D print manufacturing using bio PE compound as the material, and to verify the practical applicability of completed chairs in terms of strength, durability, weather resistance, etc.

3. LCA verification and assessment

An LCA model was created for comparing the manufacturing method based on the current furniture industry’s business model and the 3D printing manufacturing method that uses bio PE and biomass-derived filler compound as the material; and future estimation was conducted through calculating GHG emissions and reductions in CO₂ (both energy derived and non-energy derived) according to 15 preconditions based on survey of actual conditions in the furniture market, distribution, production and recycling, survey of 3D manufacturing technology, mixed filler and so on.

The results of LCA comparing the case of manufacture based on biopolyethylene 3D printing and manufacture based on rotational molding of conventional plastic (95% PP and 5% PE) showed that the amount of GHG emissions was smaller in 3D print manufacturing. Moreover, the figure was negative for both energy derived and non-energy derived emissions in 3D printing. The decline in energy derived emissions was achieved as a result of the TR substitution effect, with substitution of RPF combustion coal energy making a large contribution, and the figure was negative even when totaled over the entire lifecycle. In the conventional approach, energy derived emissions were similarly greatly reduced due to the TR substitution effect, however, since this reduction was more than offset by the raw materials manufacturing load and emissions arising from power consumption in the production phase, the eventual energy derived emissions were positive. The negative figure for non-energy derived emissions comprised carbon absorption by sugar cane, which was the crop used as the raw material for the bio PE, and soil carbon fixing arising from modification of the land used for cultivation. Since this negative portion was larger than subsequent loads, the eventual non-energy derived emissions were negative.

In sensitivity analysis, in which the filler was changed, total GHG emissions were smaller when using other filler as compared to the reference CNF adopted at the beginning of the project; moreover, the energy derived emissions were also reduced compared to the conventional approach.

Reductions of CO₂ based on this fiscal year’s demonstration experiments and surveys were calculated as 2t-CO₂ for energy derived emissions and 6t-CO₂ for non-energy derived emissions at the end of the project, and 166t-CO₂ for energy derived emissions and 645t-CO₂ for non-energy derived emissions in 2030.

In the next fiscal year, the process will be further elaborated and sensitivity enhanced through gathering manufacturing primary data on conventional products, manufacturing data on the dies used for molding, data on the volume of production per die, and manufacturing data on filler. Results from fact-finding survey of scrapping and recycling, specific images of alternative chairs made by 3D printer, and examination of the business model and recycling scenarios will be reflected in the LCA model. Verification of material recycling will be implemented based on

the results of demonstration experiments concerning regeneration and performance deterioration of pellets.

4. Market survey concerning individualized outdoor furniture made by 3D printing

Basic data for verifying and evaluating LCA were obtained through implementing market survey of companies that make plastic outdoor furniture and scale of the market, etc., and fact-finding survey of product types, production quantities, molding methods, raw materials, amount of energy used in manufacturing, materials procurement, packaging, processing losses, and treatment, scrapping and recycling activities, etc. in companies that conduct manufacturing and retailing of outdoor furniture in Japan.

In the market survey, it was found that most of the outdoor furniture sold in Japan comprises polypropylene (PP) injection molded products; the number of retailed units is 240,000, weighing a total of 850 tons and costing 2 billion yen (2018). Moreover, it was found that imported products from Italy account for 83% of domestic product sales in terms of cash value, while two major companies account for 60% of the value of sales in the remaining share of 17%.

From the fact-finding survey of production in these two domestic companies that conduct manufacturing and retailing, it was found that both companies handle PP outdoor furniture products manufactured using injection molding machines; that the large-size injection molding machines used to make integrated chair and table units have clamping force of around 1,000t–1,600t, and that the die shot count ranges from around 20,000 to 100,000 depending on the size and weight.

Many overseas PE outdoor furniture products are thought to be made by rotational molding machines. Next fiscal year, it is planned to further advance fact-finding survey of die molding, enhance the accuracy of LCA, and develop the method for conducting next year's scheduled marketability survey through examining the lifecycle and product business model for 3D print furniture made from bio PE.

Summary: The biggest issue in switching from polyethylene (PE) to bio PE is the price (roughly double). Initially, we considered halving materials consumption through 3D printing in order to overcome this issue, however, since survey revealed that existing chairs are already made with ample thinness by rotational molding, leaving no room for reducing materials any more by 3D printing, we deemed it necessary to modify our direction. However, it was found that, since the die manufacturing process is eliminated in 3D printing, making it possible to cut costs, cost benefits can be derived if the manufacturing is limited to a certain quantity. In terms of industrial parts, multiple surveys have revealed that this figure is roughly 450 units. Survey is needed to determine the watershed figure for chairs, however, if it is “a certain number or less,” even if bio PE, which costs twice as much, is used, there should be a point where the cost is offset. Moreover, in the case of chairs, unlike industrial products and containers, the price of materials does not necessarily directly connect to the sale price, but rather the sale price is determined by a complicated formula that considers design charge, etc. In the case of the 3D-printed chairs that were studied here, it is also possible to impart added value through “customization.” The switch to bio PE will be advanced upon integrating these factors.

Within this, the greatest challenge of this research project concerns modeling and optimization of the various tradeoffs that accompany the switch. These are broadly divided into two types: first is the tradeoff concerning the selection of filler (price, GHG, recycling characteristics), and second is the tradeoff concerning the various factors concerning production of 3D printers—“production speed,” “quality (durability),” “nozzle diameter and material discharge width,” and “quantity and delivery time.” From the second year onwards, we will construct an appropriate roadmap for transition upon modeling these tradeoffs, setting the strategy, and discovering an approach for totally clearing these conditions.

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. バイオポリエチレンの選定	6
1-3. フィラーの選定	7
1-4. バイオポリエチレンとの混練と 3D プリント造形評価	9
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・ペレット検証結果と課題	17
1-6. 造形適合性評価専用小型 3D プリンタ	20
(資料 1-1) 造形適合性評価専用小型 3D プリンタ仕様	21
 2. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験	 23
2-1. 椅子形状の 3D プリントに関する実証実験の目的	25
2-2. 市販品の調査と実寸椅子製造実験結果	25
2-3. 家具製造専門家による検証と課題	25
2-4. 実寸椅子製造実証実験専用の大型 3D プリンタ	26
(資料 2-1) 「市販ポリエチレン並びにこれに類する樹脂製の屋外型家具製品の 形状調査報告書」	27
(資料 2-2) 「3D プリント実寸椅子の設計・製造報告書」	53
(資料 2-3) 3D プリント実寸椅子の設計・製造(22 脚) データ・ファイル一覧	65
(資料 2-3) 実寸家具製造実験専用大型 3D プリンタ仕様	66
 3. LCA の検証・評価	 69
3-1. LCA 検証・評価の目的	71
3-2. 調査範囲	71
3-3. 影響領域と影響評価手法	77
3-4. ライフサイクルインベントリ分析(LCI)	77
3-5. ライフサイクル影響評価(LCIA)	88
3-6. 課題	103
3-7. 引用文献	104
3-8. LCA ソフトウェアへの実装の詳細	105
 4. 3D プリントによる個別化屋外型家具に関する市場調査	 131
4-1. 3D プリントによる個別化屋外型家具に関する市場調査の目的	133
4-2. 屋外型家具に関する市場調査	133
4-3. 指定企業における屋外型家具生産実態調査	136
4-4. 課題	138

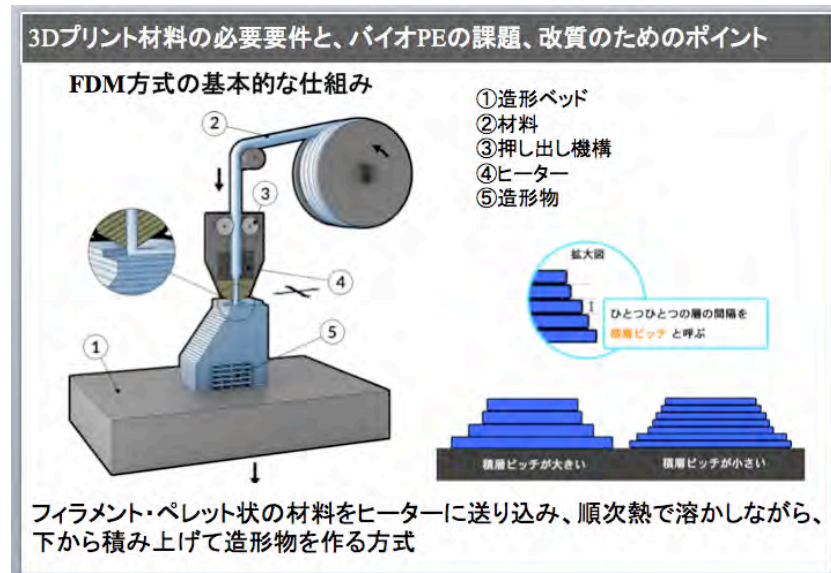
1. 3D プリント可能なバイオポリエチレン・ コンパウンド・ペレットの技術開発

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を行う。混練後の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。家具製作に必要な十分な「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）を実際に 3D プリントによる評価実験を行い見極める。

■3D プリントで使用可能な材料選定について

今回、製造方法として検討する 3D プリント(FDM 法)は、熔融した熱可塑性樹脂を造形ベッドに順次積み上げる方法である。FDM は、他の工法の 3D プリントと比較して、造形精度は劣るものの、一定の条件を満たした熱可塑性樹脂であれば幅広い材料を使用することが出来るのが特徴である。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ため、本プロジェクト検討では FDM 方式に絞って材料開発を行う。(将来的には粉末焼結法:SLS でも PE パウダーが使用可能になる可能性はあるが、現時点では使用不可能である)



熱溶解積層法:FDM 用材料には、金型と圧力を用いて形状を規定する射出成形などと異なり、造形空間(圧力のない空間)にノズルから吐出された樹脂を配置していき、それを繰り返して積層していく独特の造形方式である。この造形方式に伴い、使用材料には特殊な性能が求められる。

■FDM 用材料として求める性能

・超低収縮材料

造形時の要件として第一に「収縮率の小ささ」が求められる。FDM では、ノズルから出た時点から樹脂の冷却と収縮が開始してしまうため、収縮率が大きい樹脂はうまく形状を保つことが出来ない。具体的に最も頻度の高い不具合例は、造形面に配置された樹脂（ファーストレイヤー）が、収縮により造形面から離れる方向に反り、ワークが造形面から剥がれて脱落が発生することである。その他、造形中に形状の一部が収縮によって 3D データ形状からずれていくことで、造形物とノズルの接触などのトラブルにつながり、造形物や機械自体の破損を生じる場合がある。現在 FDM 方式の 3D プリント材料としては、ポリ乳酸:PLA(収縮率 0.3-0.5%)が最も一般的に使用されている。最も身の回りに溢れている樹脂である PP や PE は収縮が大きく FDM 方式の 3D プリントで使用する事が難しい。今回使用を目指しているバイオ PE も基本物性は石化 PE と変わらないため、何らかの方法で収縮率抑制が必要である。炭素繊維・ガラスファイバー・ガラスウール・木質繊維などのフィラーを配合することによって収縮率の抑制を目指す。

Material	Shrinkage (%)
PP	1-2.5
PE	1.5-5.0
PA	0.9-1.5
ABS	0.3-0.8
PLA	0.3-0.5

表 1-1. 一般的な熱可塑性樹脂の収縮率

・層間の熱融着力

第2に造形後に必要となる要件として、造形物の強度に大きく寄与する「層と層の融着力」が挙げられる。3D プリントモデルは射出成形で言うところの「ウェルド」の集合体であるために、造形物の破損の際には、層が剥がれるような独特な壊れ方となる。そのため、造形物の強度を評価するにあたっては材料自体の物性に加えて、層同士の融着力が重要となる。収縮抑制のためのフィラーの配合量によって層間融着力を低下させてしまう懸念があるため、配合バランスには注意が必要である。

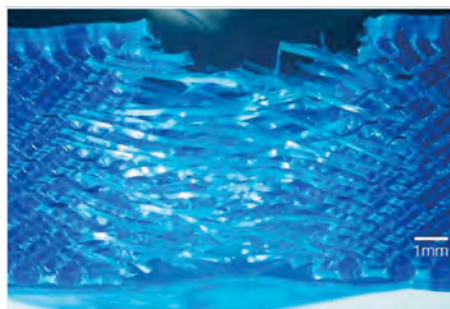


図 1-1. 3D プリント部品の破壊モード:層がはがれるように破壊が始まる

3Dプリント材料の必要要件と、バイオPEの課題、改質のためのポイント

FDM方式の メリット デメリット

- ・幅広い材料(熱可塑性樹脂)が使用できる
- ・材料費が他方式に比べて圧倒的に低コスト
- ・比較的安価な機械⇒大型化が容易
- ・造形精度は、光造形方式・粉末焼結方式に劣る。

材料に求める 基本性能

- ・収縮がとにかく小さいこと (0.3% PLA同等を狙いたい)
基本的にPP,PE(1%以上)など、収縮が大きい樹脂は使えない。
- ・層間の接着力が強いこと
収縮を押さえるためのフィラー量とトレードオフなので、配合量に気をつける



収縮による反り



収縮により、層が裂ける

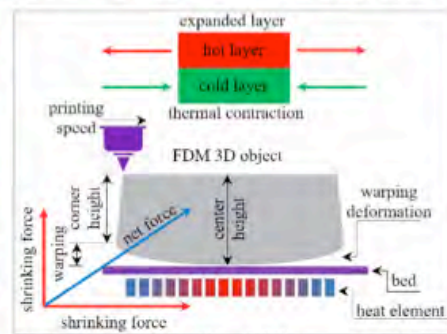
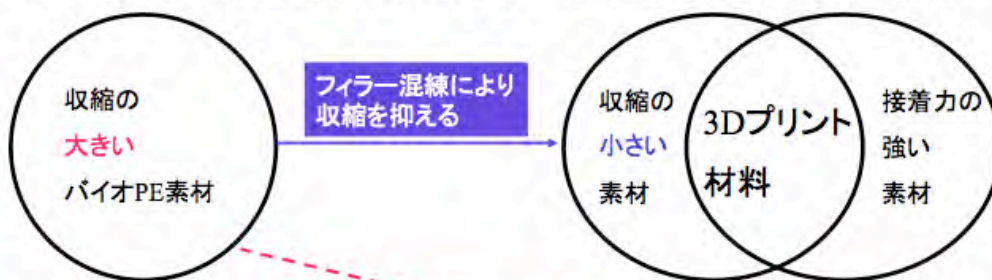


Fig. 2. warping deformation and its method of measurement at each corner

3Dプリント材料の必要要件と、バイオPEの課題、改質のためのポイント

- ・バイオPEの収縮率を極限まで下げる
- ・その上で層間の融着力をキープすること
- ・そのためにバイオマス由来のフィラー(強化および、収縮を抑える素材)
- ・バイオマスフィラーの劣化を防ぐために、なるべく造形温度の低いベース樹脂選定



ただし、フィラーを入れすぎると、接着力が低くなるので、配合バランスが大切

バイオに限らずオレフィン系であるPEの収縮率は大きく、このままでは3Dプリントに使えないこれに対し、フィラーの混練を行って0.3%程度(PLAと同等レベル)に抑えることが出来る配合を見つけることが、本プロジェクトに用いる材料開発としての最低達成要件である。

1-2. バイオポリエチレンの選定

現在、バイオ PE を製造している世界で唯一の企業であるブラスケム社(代理店: 双日プラネット株式会社)のバイオ PE カタログ(物性表)より、3D プリント時に重要となる MFR(メルトフローレート)の値から、HDPE と LDPE より、5 種類の材料をベース候補として選定した。

※MFRは造形温度で 10g/min 程度が好ましい。これ以下だと流動性が低すぎて形状の再現性に劣り、これ以上だと流動性が高すぎて形状を保持できない(形状が固まらずに崩れてしまう)

5 グレードにて 3D プリント評価を実施し、各グレードでの適切な造形温度と収縮の評価を行った。その結果より、ベース材として HDPE:SHC7260、LDPE:SBC818 を選定した。

グリーンポリエチレン 物性表

HDPE			フィルム	射出			
項目	測定規格	単位	SGM9450F	SHA7260	SHC7260	SHD7255LS-U	SGE7252
MFR(190/21.6)	D1238	g/10 min	9.3				
MFR(190/2.16)	D1238	g/10 min		20	7.2	4.5	2.2
MFR(190/5)	D1238	g/10 min	0.33				
密度	D792	g/cm3	0.952	0.955	0.959	0.954	0.953
引張降伏応力	D638	MPa		29	30	27	(ISO 527-2) 24
引張降伏応力(フィルム 機械/横方向)	D882	MPa	40/30				
引張破断応力	D638	MPa					(ISO 527-2) 17
引張破断応力(フィルム)	D882	MPa	40/50				
引張降伏伸び(フィルム)	D638	%		7.2	7.5		(ISO 527-2) 10
引張降伏伸び(フィルム)	D882	%					
引張破断伸び(フィルム)	D638	%	(D882 MD620/TD680)				(ISO 527-2) 933
引張セカントモジュール(1%)	D882	MPa					
曲げ弾性率(1% セカント)	D790	MPa		1350	1350	1270	(ISO 178) 1000
ショア硬度(D型/15)	D2240	-		64	64	63	
アイゾット衝撃応力(23°C)	D256	J/m		25	35	45	
落錐衝撃強度(12 μ m)	D1709	g-F50	210				
耐環境応力亀裂(10%)	D1693	h/F50					69
耐環境応力亀裂(100%)	D1693	h/F50		< 4	< 4	< 5	
熱変形温度(0.45MPa)	D648	°C		74	76	74	
ピカット軟化点(10N)	D1525	°C		124	126	127	
バイオベース(最低値)	D6866	%		94.5	94.5	94.5	96
主な用途・特徴			ブローフィルム 袋全般 広分子分布 bimodal	日用品 ペール缶、キャップ 狭分子分布	コンテナ、ヘルメット 紫外線吸収剤 高強度	容器、箱 紫外線吸収剤 高強度	ボトルキャップ コンテナ bimodal
ポリ衛協 PL取得有無			申請中	無	無	無	申請中

LDPE			押し出しラミ		
項目	測定規格	単位	SBC818	STN7006	STS7006
MFR(190/21.6)	D1238	g/10 min			
MFR(190/2.16)	D1238	g/10 min	8.1	0.6	0.6
MFR(190/5)	D1238	g/10 min			
密度	D792	g/cm3	0.918	0.924	0.924
破断強度(機械方向/横方向)	D882	MPa			
引張降伏応力	D638	MPa			
引張破断応力(機械方向/横方向)	D882	MPa	25/20	25/20	25/20
引張破断応力	D638	MPa			
引張破断伸び(フィルム)	D638	%			
引張破断伸び(機械方向/横方向)	D882	%	380/870	350/700	350/700
2%セカントモジュール	D882	MPa		140/170	140/170
曲げ弾性率(1% セカント)	D882	MPa	70		
曲げ弾性率(1% セカント)	D790	MPa			
落錐衝撃強度	D1709	g/F50	64	170	170
エルメンデルフ引裂強度	D1922	gF	NDb/56		
エルメンデルフ引裂強度(機械方向/横方向)	D1922	gF		310/250	310/250
ヘイズ	D1003	%	8	8.5	9
光沢(45° 角)	D2457	%		60	60
光沢(60° 角)	D2457	%	76	86	84
ショア硬度	D2240	-			
ピカット軟化点(10N)	D1525	°C			
バイオベース(最低値)	D6866	%	95	95	95
主な用途・特徴			押し出しラミ マスターバッチ・射出 無添加 Autoclave	共押フィルム チーズ・ハム包装 無添加 低ゲル	共押フィルム チーズ・ハム包装 SL剤(中)、AB剤(中) 低ゲル
ポリ衛協 PL取得有無			有	有	無

表 1-2. ブラスケム社 バイオ PE カタログ(グリーンポリエチレン物性表)より抜粋

1-3. フィラーの選定

■ PP/GW コンパウンドの評価

まず家具製作に必要な十分な「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の比較対象・目標性能の確認を目的として、オレフィン系樹脂を用いた 3D プリント材料で既に市場にある PP/GW(ガラスウール)コンパウンドの性能評価を行った。ナノダックス株式会社が独自技術で混練に成功した材料で、収縮抑制効果が高く、射出成型などの反り防止などに既に実用化されている。3D プリントにおける評価の結果、十分な収縮抑制効果があることが分かった。

オレフィン系樹脂でも適切な配合を行えば 3D プリントに使用できることが確認できたので、バイオ PE をベースとして用い、バイオ由来のフィラーを用いて GW に匹敵する収縮抑制効果を達成できれば、今回の目的である家具サイズの 3D プリントが可能な材料を得られると予想される。

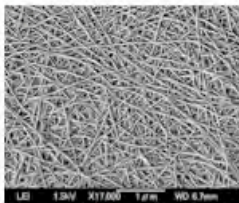
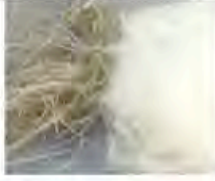


図 1-2. SBC818(上図)と PP/GW(下図)の比較:長さ 900mm の造形物。収縮の違いが分かる

※ナノダックス社は独自の特許技術により、綿状のフィラーを樹脂に均一にコンパウンドすることが可能な数少ないメーカーである。GW にて実用化されている本技術をセルローズファイバーにも適用できる可能性もあり、今後検討する。

■ バイオ由来フィラーの検討候補

GW での検討結果より、収縮抑制効果はフィラー形状に大きく依存し、粉状(タルクなど)・棒状(ガラスファイバーなど)よりも、綿状(GW など)であることが有効と考えられる。バイオ由来フィラーの選定については、繊維が細い順にセルロースナノファイバー、セルロースファイバー、針葉樹綿を第一候補として検討する。

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)
・針葉樹綿 繊維径 15-20 マイクロメートル 繊維長 1000 マイクロメートル以上  予想されるメリット グラスウール同等の収縮抑制効果が期待できる 予想されるデメリット 綿状なので、樹脂への配合が難しい	・グラスウール 繊維径 4-5 マイクロメートル 繊維長 1000 マイクロメートル以上  予想されるメリット 既にPPで実績があり、GF以上の効果確認済み 100%リサイクル材料 樹脂の融点に制約がない 予想されるデメリット バイオマス素材ではない

1-4. バイオポリエチレンとの混練と 3D プリント造形評価

■ 検討① 星光 PMC セルロースナノファイバー

京都プロセスを用いてセルロースナノファイバー (CNF) を混練することが出来るメーカー 星光 PMC 株式会社の提案で、バイオ PE に対するフィラーの収縮抑制効果を検証する前に、石化 PE に対して CNF:セルロースナノファイバー(20%添加)のコンパウンド試作を行って造形評価を行った。



図 1-3. LLDPE ベース T-NC283 造形温度 210℃ 造形試験結果



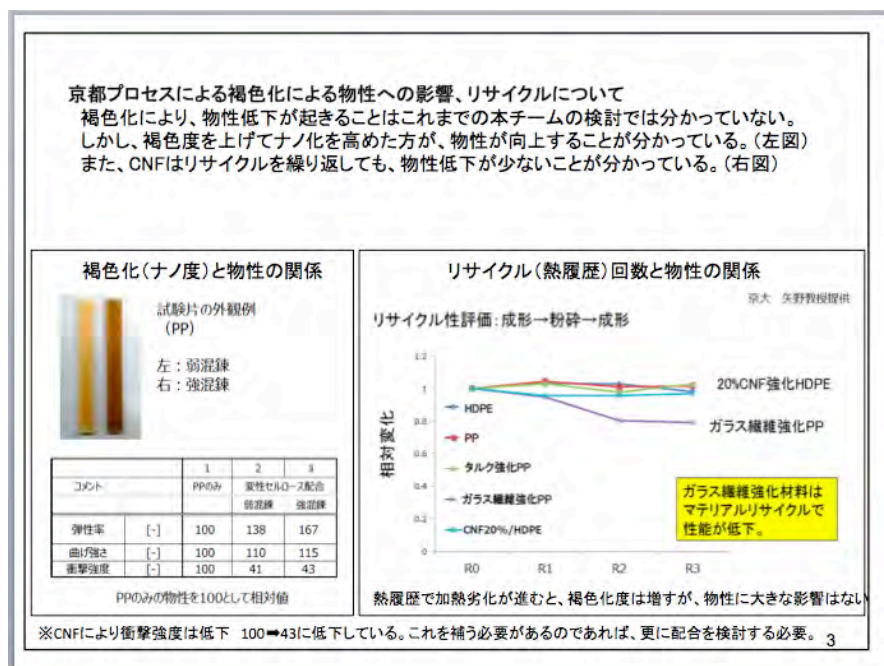
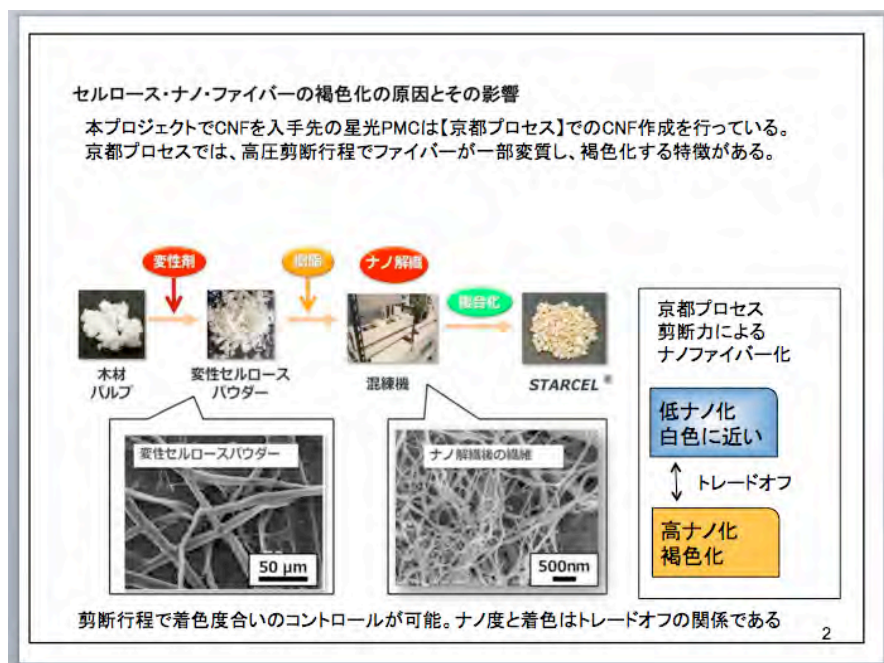
図 1-4. HDPE ベース T-NC285 造形温度 260℃ 造形試験結果

この結果、3D プリント時に 260℃程度の高温を必要とする HDPE 群は、バイオ由来フィラーの熱劣化が不可避となることがわかったため、今回の開発では候補から外すこととした。以後、200℃程度で 3D プリントが可能な LDPE (SBC818) に絞って、フィラーの検討を進めることにした。

■ セルロースナノファイバーの安定供給と価格に関して

CNF は、収縮抑制効果が高く、層間融着の阻害も少ないため、性能が高く有望な材料である。しかし星光 PMC 社や他のコンパウンドメーカーでの混練技術はまだ開発段階であり、①価格の高さ（20000 円/kg）と、②生産キャパシティの少なさにより、本検討で性能の高い材料が開発できたとしても、実使用は難しい懸念がある。

また、京都プロセスでは、樹脂に CNF を混練する際の高温と高剪断（圧力）により、CNF の褐色化が発生する。褐色化による物性への影響については、過度に心配する必要はないことが分かっているが、着色性などに影響が出ることが考えられる。



■ 検討② 幸和テック セルロースファイバー 【20, 200, 900 μ m】

セルロースナノファイバーはコスト面で不利であることから、低コスト化を狙うために、双日プラネット株式会社と協業しているコンパウンドメーカーの幸和テック株式会社に、セルロースファイバー・針葉樹綿のコンパウンドを依頼した。セルロースファイバーは、長さが異なる【20, 200, 900 μ m】の3水準を用意し、ファイバーの長さによる効果の違いを検証した。その結果、繊維長が長いほど良い結果となった(900 μ m が最も優れた収縮抑制効果を得られる)。しかし長くなるほど、フィラーの嵩が高くなることからコンパウンド時にフィラーを上手く配合できない。また、樹脂の中で凝集する事が課題となる。凝集を起こすと、その部分で材料の強度が低下する恐れがあるため、改善が必要である。星光 PMC 社のような京都プロセス法を用いれば凝集せずにコンパウンドできるが、生産性(コスト)とのトレードオフとなる。京都プロセス以外の方法で、上記の不具合を解消できるコンパウンド方法の確立が重要である。



図 1-5. LDPE:SBC818 ベース 20 マイクロメートル 造形試験結果



図 1-6. LDPE:SBC818 ベース 200 マイクロメートル 造形試験結果



図 1-7. LDPE:SBC818 ベース 900 マイクロメートル 造形試験結果

■ 検討③ 幸和テック 針葉樹綿

針葉樹綿は、木材加工の際に発生する副産物であり、製造に特別なコストや、環境負荷をかけずに入手できることから、更に環境に優しいフィラーになることを目指し、フィラー候補に選定した。しかし、900 μ m のセルロースファイバーより、更に嵩が高く、コンパウンド難易度が非常に高いことが判明した。凝集が多く、3D プリント時にノズルのつまりの原因となることが懸念されるため、一度検討から外し、長繊維セルロースファイバーのコンパウンド方法が確立された後に、再び検討の机上に乗せるか判断を行う。



図 1-8. LDPE:SBC818 ベース 造形試験結果

■ 検討④ 星光 PMC 京都プロセスによるセルロースファイバー

凝集なくファイバーを配合し、かつコストを低減させるため、星光 PMC 社の京都プロセスを用いて低剪断(=低ナノ化)での押し出し条件にて、時間辺りの生産数量を向上させることを狙った配合にて試作を行った。結果としては、均一なコンパウンドが得られたが、今回同社が SBC818 を用いた初めての配合だったことにより相溶化剤の選定が上手くいかず、非常に脆いサンプルが出来上がった。今後、相溶化剤の選定を改善して再度同押し出し条件で試作を行い、「均一なフィラー配合」と「強度」の両立を目指す。

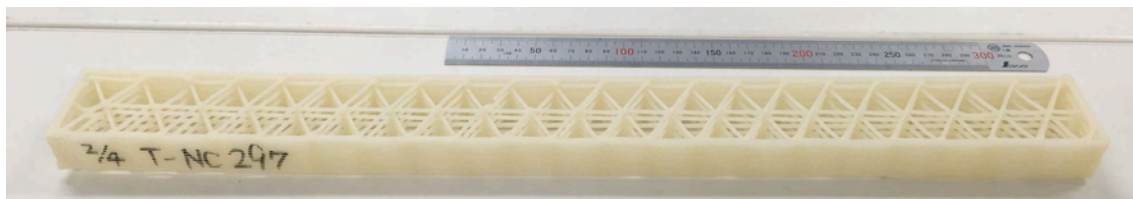


図 1-9. LDPE:SBC818 ベース T-NC297(ナノ度:低) 造形温度 210°C 造形試験結果

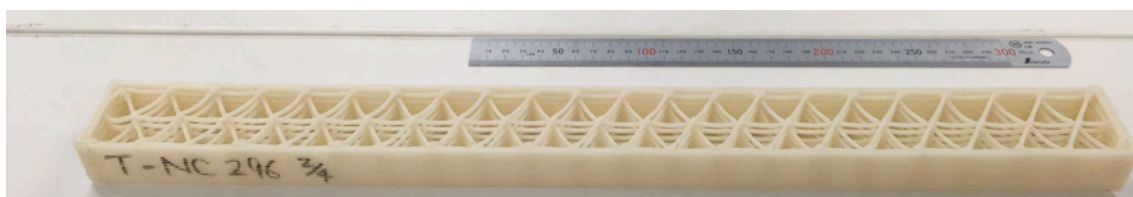


図 1-10. LDPE:SBC818 ベース T-NC296(ナノ度:中) 造形温度 210°C 造形試験結果

- ・ 成形収縮の抑制効果は、どちらも大きい。家具サイズでも使用可能と判断できる。
- ・ T-NC297(ナノ度:低)の方が、色味が白に近い。
- ・ どちらも非常に脆く、家具としての使用不可能な強度と判断した。

原因を星光 PMC 社にヒアリングしたところ、今回使用したバイオ PE(SBC818)に適していない相溶化剤の使用と、混練時の条件設定に改善可能性がある事が判明したため、再度条件を見直して試作対応行うこととなった。4 月以降の対応予定。

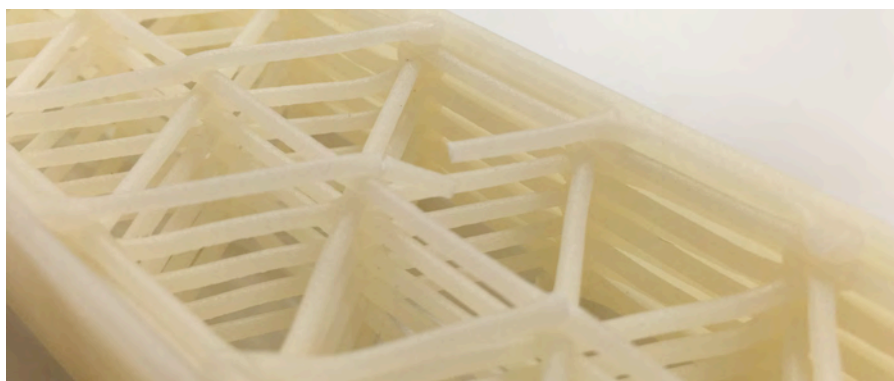


図 1-11. 中央部の構造が折れてしまっている。脆く、曲げなどによる変形で破断が起きってしまう

■ 検討⑤ ナノダックス PE/GW20%

収縮抑制効果の比較対象として、バイオ PE : SBC818 に GW を配合した材料のテストを実施した。

結果としては、ベース材料をバイオ PE に変更しても、PP/GW と同程度の収縮抑制効果が現れることが分かった。また 40%配合したものは脆くなった。これにより、フィラーの高濃度配合によって、強度低下が起きることがわかった。

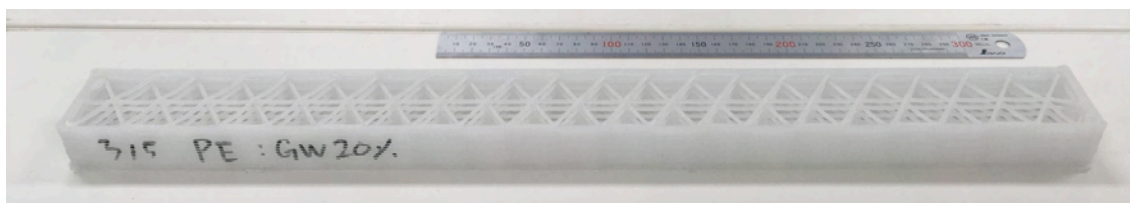


図 1-12. PE/GW20% 造形試験結果

■ 検討⑥ ナノダックス セルロースファイバー

繊維長の長いセルロースファイバーは嵩が高くコンパウンドが難しいという課題に対して、ナノダックスの技術を用いた均一コンパウンドを目指して試作を行った。

結果として、均一なコンパウンドは達成されたように見えるが、造形温度 210℃程度で発泡が発生してしまい、造形品質が劣る結果となった。原因としては、幸和テック社とは別の供給先から手に入れたセルロースファイバーの性質の違い(劣化温度が低い可能性)によるものと推測されるが、まだ評価途中である。ナノダックス社の技術で、ファイバーの均一配合は達成される目処がついたので、今後、フィラーの再選定を行い、発泡の発生を押さえた再試作を行う予定である。

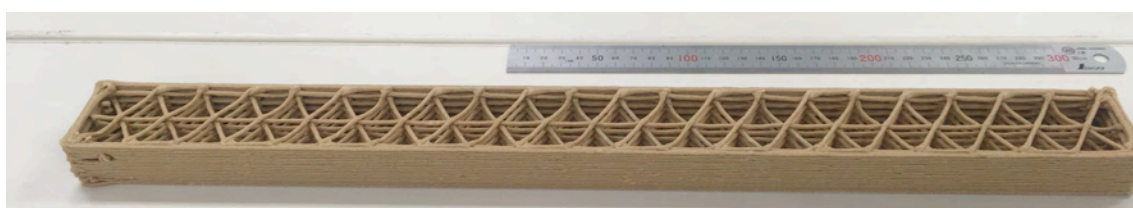


図 1-13. SBC818 /セルロースファイバー造形試験結果



図 1-14. セルロースファイバーが 210℃程度の造形温度で劣化、ガスが発生し発泡した

■ 検討⑦ 幸和テック セルロースファイバー 400 μ m, 900 μ m

前回の幸和テックでのコンパウンドでは、繊維長の長い(900 μ m)セルロースファイバーで最も高い収縮抑制効果が出たが、嵩高によるコンパウンド時の不具合があった。そこで今回は、200 μ mと900 μ mの中間の繊維長である400 μ mのファイバーを用いた試作を行った。また900 μ mについても、ニーダーを2度通す方法により混練状態の改善を狙って再度試作を行った。

結果としては、どちらも凝集状態に目に見えた改善はなかった。繊維長の長いフィラーのコンパウンドには、特殊な方法を用いる必要性が高い。

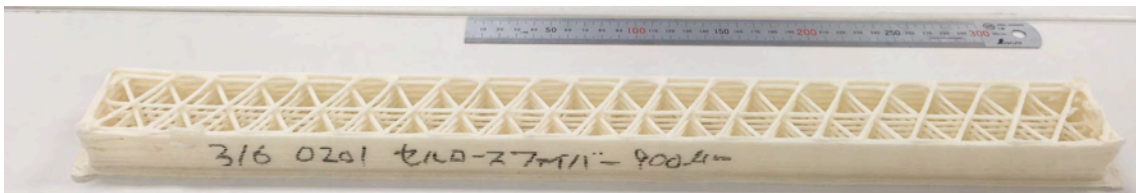


図 1-15. SBC818 /セルロースファイバー900 μ m(2回混練により分散性向上狙い)造形試験結果

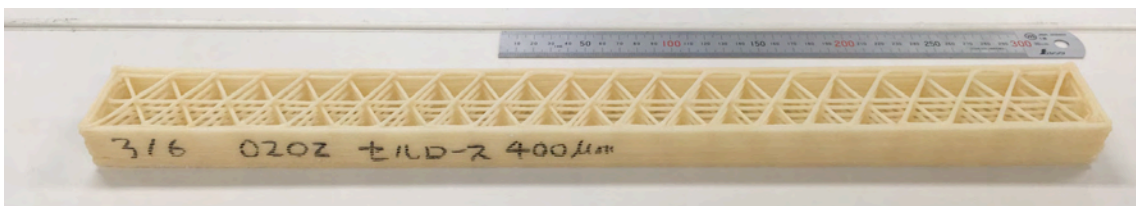


図 1-16. SBC818 /セルロースファイバー 400 μ m 造形試験結果

■ 検討⑧ 幸和テック 木粉コンパウンド

これまでとは別のアプローチとして、粉末・繊維など、複数の形状が混合された木質フィラーを用いた試作を行った。これは、針葉樹綿と同様に木工工場の生産ラインで発生する副産物を利用したもので、リサイクル原料であることから環境負荷の更なる低減とコスト低減を狙える材料である。目の粗さを変えたメッシュによって、フィラー形状の選定を行い、形状の差による収縮抑制効果を検証した。結果としては今回試作した木粉フィラーでは、形状・大きさによる差はほとんど見られなかった。収縮抑制効果も、綿状のフィラーに対しては小さい。やはり、フィラー形状による収縮抑制効果の差は大きいことが分かった。しかし、低コストで一定の収縮抑制効果が得られるため、今後、木粉と綿状のフィラーを混ぜ合わせた配合検討も検討価値があると考えられるので、継続して検討する。

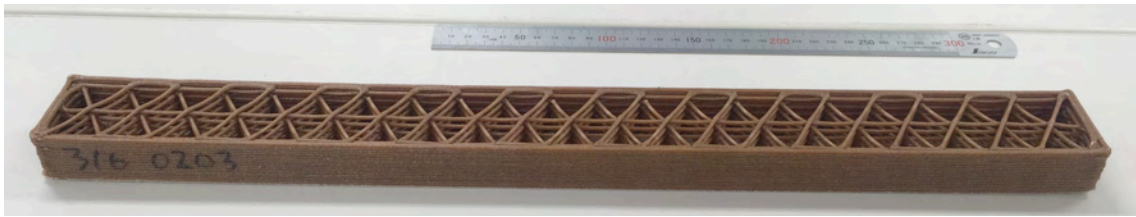


図 1-17. SBC818 / 木粉 178 μm 以下 造形試験結果

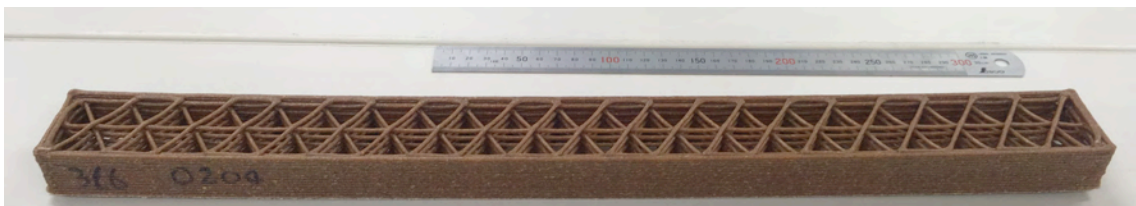


図 1-18. SBC818 / 木粉 1000 μm 以下 造形試験結果

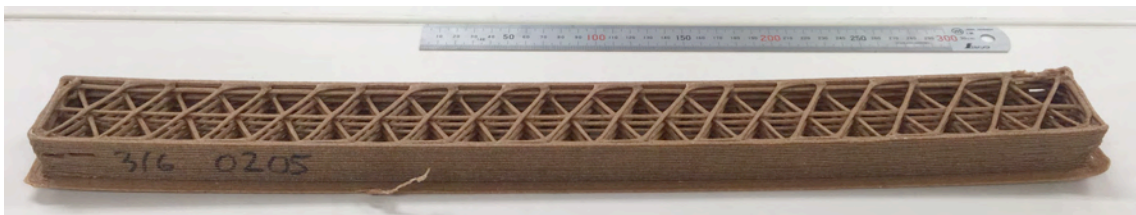


図 1-19. SBC818 / 木粉 178 μm 以上～1000 μm 以下 造形試験結果

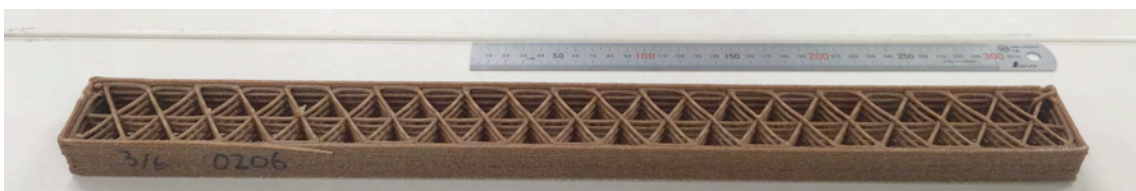


図 1-20. SBC818 / 木粉 178 μm 以上～500 μm 以下 造形試験結果



図 1-21. SBC818 / 木粉 1000 μm 以下(上)、SBC818 / 木粉 178 μm 以下(下)を比較

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 評価結果と課題

まず樹脂の中では比較的熱収縮が大きい主剤となるバイオ PE の中から、バイオマス・フィラーを痛めず 3D プリント積層に適する溶融温度(210 度)を有し、収縮性が比較的小さいブラスケム社 LDPE SBC818 を選定した。

主剤の収縮抑制により 3D プリント適合性および家具としての強度の改善を目指すフィラーの検討では、

(1) 星光 PMC 社京都プロセスによるセルロースナノファイバーと同社支給の石油由来の LLDPE のコンパウンドは、「収縮抑制効果が優れているが、茶褐色の着色」が難点であった。

(2) 幸和テック社の繊維長の長い(200 μ m から 900 μ m)セルロースファイバーと SBC818 のコンパウンドでは、「高い収縮抑制効果が見られたが凝集状態がみられる(嵩高によるコンパウンド時の不具合)」ことに課題があった。

(3) 星光 PMC 社とバイオ PE SBC818 とセルロースナノファイバーの混練可能性を検討したところ「技術的にコンパウンド製造は可能だが、量産化しても価格は 20,000 円/kg から下がらない」とのことだったが、幸和テック社のセルロースファイバーとの混練は、「試作段階では、5,000～10,000 円/kg だが、量産により大幅に下げられる」とのことで、今回の目的となる家具製造の観点から、フィラーとしては、セルロースナノファイバーの検討(コンパウンド試作開発)は保留とし、繊維長 200 μ m から 900 μ m のセルロースファイバーにフィラーの候補を絞り開発することにした。

(4) 星光 PMC 社京都プロセスの混練過程でナノ化を押さえたセルロースファイバーと SBC818 のコンパウンド試作では「非常に脆い結果」となり相溶化剤の選定などの改善が必要とされた。

(5) グラスウールの混練技術を有するナノダックス社に、同社入手のセルロースファイバーと SBC818 のコンパウンド試作を依頼したところ「発泡が発生し、脆い結果」となり、セルロースファイバーの改善が必要とされた。

これら本年度試作コンパウンドの内容と 3D プリント適合性評価の一覧表を(表 1-3)に示す。

「バイオ PE (SBC818)とフィラー(繊維長 200 μ m から 900 μ m のセルロースファイバー)の選定」に目処がついたが、「3D プリントに適合するコンパウンド製造」は途上であり、「層間融着力、収縮抑制効果は、視認による判断のレベル」で、強度・精度の定量評価は今後の課題である。

- ・星光 PMC 社、幸和テック社には混練プロセスの改善

- ・ナノダックス社には、フィラー(セルロースファイバー)の供給改善による混練試作

により、3D プリント適合性のあるコンパウンド製造をクリアした上で、

紫外線吸収剤、光安定剤、着色剤添加による屋外型家具としての耐候性向上試験および評価

実寸椅子製造による造形精度、強度・耐久性試験および評価

を行い、コンパウンドの品質改良を加えていくことにする。

表1-3. バイオポリエチレン・コンパウンド内容と3Dプリント適合性評価結果一覧

	ベース樹脂検討		到達目標		京都プロセスCNF			
No.	—	—	図1-2	図1-12	図1-3	図1-4	図1-9	図1-10
ベース材料	SHA7260	SBC818	支給PP	SBC818	支給HDPE	支給LLDPE	SBC818	SBC818
	HDPE	LDPE	PP	LDPE	HDPE	LLDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	非バイオ	バイオ	非バイオ	非バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	—	—	GW	GW	CNF / ナノ 高	CNF / ナノ 低	CNF / ナノ 中	CNF / ナノ 高
	—	—	非バイオ	非バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
コンパウンド業者	—	—	ナノダックス	ナノダックス	星光PMC	星光PMC	星光PMC	星光PMC
配合率	—	—	20%	20%	20%	20%	20%	20%
層間融着	260℃以上で○	180℃以上で○	○○	○○	×	○	○	○
収縮抑制	× ×	×	○○	○○	△	○	△非常に脆い	△非常に脆い
結果・備考	200℃以上でバイオ バイオフィラーの劣化が起らない温度範囲で造形可能		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CNF】配合としては理想的だが、価格が高く、このままでは事業化不可能。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。ただし、京都プロセスを用いる以上、材料価格は変化しない可能性がある。			

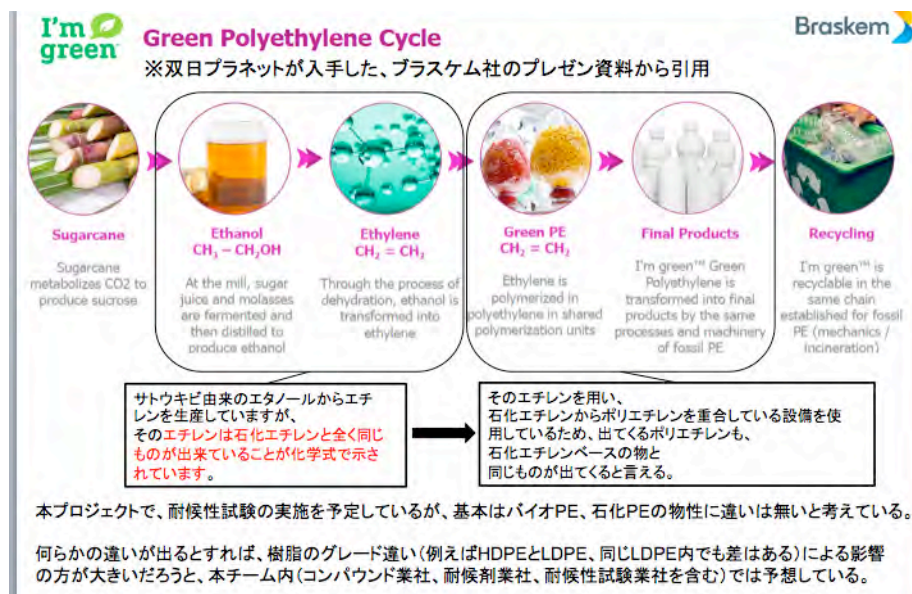
	コンパウンド法 セルロースファイバー					
No.	図1-5	図1-6	図1-16	図1-7、15	図1-8	図1-13
ベース材料	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818
	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	CF / 20 μm	CF / 200 μm	CF / 400 μm	CF / 900 μm	針葉樹綿 / 1000 μm～	CF
	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
コンパウンド業者	幸和テック	幸和テック	幸和テック	幸和テック	幸和テック	ナノダックス
配合率	20%	20%	20%	20%	20%	20%
層間融着	○	○	△凝集有り	△凝集有り	△凝集有り	△発泡有り
収縮抑制	×	△	△	○	△	○
結果・備考	【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。					ナノダックス設備で繊維長が長いファイバーの混練目処がついた。セルロースファイバーを再選定予定。

	コンパウンド法 木質パウダー			
No.	図1-17	図1-18	図1-19	図1-20
ベース材料	SBC818	SBC818	SBC818	SBC818
	LDPE	LDPE	LDPE	LDPE
	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
フィラー	木質パウダー 178 μm以下	木質パウダー 1000 μm以下	木質パウダー 178 μm以上～1000 μm以下	木質パウダー 178 μm以上～500 μm以下
	バイオ	バイオ	バイオ	バイオ
コンパウンド業者	幸和テック	幸和テック	幸和テック	幸和テック
配合率	20%	20%	20%	20%
層間融着	○	○	○	○
収縮抑制	△	△	△	△
結果・備考	木質パウダー：収縮抑制効果はセルロースファイバーに及ばないが、副産物素材のため、低コストで一定の収縮抑制効果が得られるため、今後、木粉と綿状のフィラーを混ぜ合わせた配合検討も検討価値があると考えられ、継続して検討していく。			

※一般に、フィラーの配合率が20%を超えると、層間融着に不利に働くため、まずは20%に統一して各フィラーごとの効果を比較している。

■ バイオ PE の耐候性能検証と、向上検討について

今回検討している配合が、屋外家具としての使用に耐えうる耐候性を保持しているか否か、また耐候性の向上方法について検討を進めた。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。この検証と、耐候性向上の評価のため、UVA:紫外線吸収剤の Tinuvin 479 と HALS:光安定剤の Tinuvin XT850 の添加による効果検証を予定している。また、紫外線自体が樹脂の内部に入ることを防止するため、着色剤には無機系の着色剤を用い、光を効果的に反射させることによる更なる耐候性の向上を狙う。試験はスーパーキセノンウェザーメーターを用い、屋外での 7 年使用相当である 1260 時間の評価を行う予定である。また、本検討ではバイオ由来フィラーを用いるが、それらの屋外使用による加湿劣化の懸念がある。これも、スーパーキセノンウェザーメーターによる試験時に同時に検証する。



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

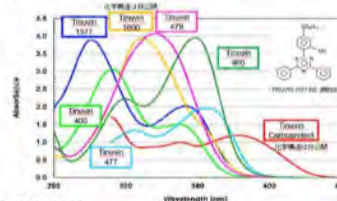
■長時間暴露試験

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



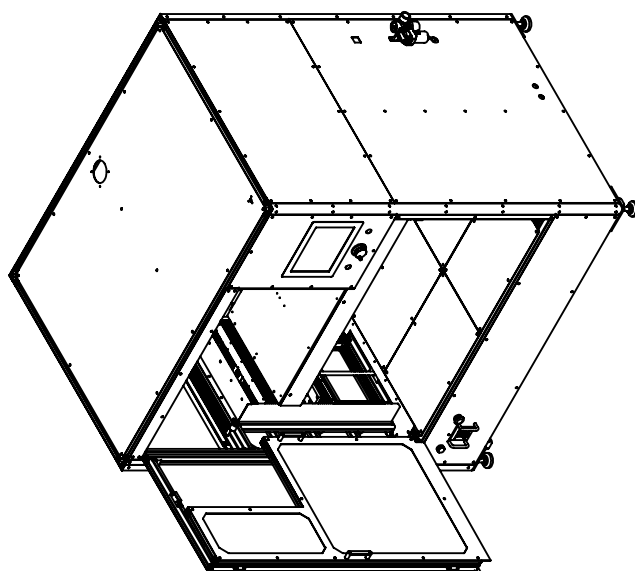
1-6. 造形適合性評価専用小型 3D プリンタ

バイオポリエチレンとセルロースナノファイバーなどのバイオマス由来のフィラーを配合混練して得られたコンパウンド・ペレットの造形(3Dプリント適合性)評価は、共同実施者エス.ラボ株式会社の設計・製造による本実証事業専用小型 3D プリンタ GEM400D を利用した。その仕様と設計図を(資料 1-1)に示す。

次年度も、バイオポリエチレン(PE)コンパウンドの 3D プリント適合性評価実験に利用する。

(資料1-1) 造形適合性評価専用小型3Dプリンタ 仕様

型式	GEM400D
本体寸法	横1,470mm×奥行980mm×高さ1,800 mm
造形寸法	横400mm×奥行400mm×高さ400mm
本体重量	約430Kg
入力電源	AC200V 三相 8kVA 程度
造形方法	熱融解積層方式 (FDM方式)
駆動モーター	サーボモーター
XY最大移動速度	200mm/s
軸ガイド方式	全軸リニアガイド
ノズル数	2
吐出方式	フルフライトスクリュー
対応ノズル径	1mm,2mm,3mm,4mm,5mm,6mm
スクリュー径	φ20mm
使用材料	原料形状 φ1～φ4程度のペレット形状
吐出能力	～5kg/h程度 ※材料・ノズル径等条件によります
ヘッド (シリンダ) 温度	100℃～350℃
ヘッド加熱方式	カードリッジヒータ (各ヘッド4ZONE)
テーブル温度	最大80℃
テーブル加熱方式	ラバーヒータ
材料供給方式	手動投入
供給エア圧	0.35～0.60MPa
操作方式	タッチパネル (PLC内臓) での操作選択、キーボード付属
外部との通信	なし、USBメモリでデータ入力可
付属スライサソフト	Simplify3D (ライセンス)
スライサへのデータ入力形式	STL形式
安全対策	保護カバー 漏電しゃ断器 過負荷防止装置 過熱防止装置 非常停止ボタン2箇所

[illegible]

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

椅子形状の設計ツール開発とそれを利用した大型 3D プリンタによる実寸の椅子の製造実証実験を 20 脚程度行い、バイオポリエチレン・コンパウンド・ペレットにも適用可能な 3D プリント造形条件(積層方向、ノズル径、温度および造形速度の設定など)を見いだす。製造実験は、共同実施者 エス. ラボ株式会社(京都府京都市)で実施し、家具製造専門家による実地検証を行う。

2-2. 市販品の調査と実寸椅子製造実験結果

本年度の実寸椅子製造実験は、まず「市販ポリエチレン並びにこれに類する樹脂製の屋外型家具製品形状」を網羅的に調べ(資料 2-1)、そこから 3D プリント積層造形に適した設計・製造条件:

1. サポート材がなくても造形ができる
2. 積層可能性を担保するためオーバーハングは 45 度以内におさめる
3. 「一筆書き」のツールパスを設計する
4. 20 時間以内で造形製造が終わる

の観点から 20 脚程度の製造実験候補を選び、積層の方向や形状の検討より、最小限の変更や修正を行って 3 次元モデルを作成した。素材としては、バイオ PE とフィラーの選定、配合が定まっていない段階なため、植物由来のプラスチック PLA(ポリ乳酸)ペレットを利用した。PLA は 3D プリント材料として実績があり、3D プリントヘッドの熔融温度、積層性、層間接着性などは比較的問題ないが、ノズル径、熔融温度、吐出量、移動速度、移動の曲率等 3D 設計とプリント条件設定に由来する不具合が発生するので、実寸大の椅子を完成させるには、3 次元モデル設計、設定条件の調整、製造実験の繰り返しが必要になる。株式会社ブーリアン(再委任)に実験スペースを提供し、実寸大の椅子が造形できる本事業専用の大型 3D プリンタ(2-4. 参照)を用いて製造実験を行った。同 3D プリンタにおける造形条件(代表値)は:

- ・ノズル径: $\Phi 5\text{mm}$
- ・設定温度: スクリュー1: 180°C スクリュー2: 185°C スクリュー3: 190°C スクリュー4: 195°C
- ・射出量(吐出量): 200%

で、完成した 3D プリント実寸椅子 22 脚の造形結果写真と、それぞれの使用材料重量と製造出力時間、外形のリスト、設計・製造実験時のコメント(資料 2-2)、および 3D モデル(STL)、造形パス・データ(G-code)と造形条件設定ファイル(3D プリンタ制御ソフト Simplify3D の factory ファイル)一覧(資料 2-3)をそれぞれ示す。

2-3. 家具製造専門家による検証と課題

今回は限られた期間に相当数の製造実験をこなすために、造形結果から形状設計検討のブラッシュアップをする時間が十分にとれなかったが、製造した 3D プリント実寸椅子 22 脚を家具製造専

門家(株式会社オカムラデザイン本部プロダクトデザイン部長、マーケティング本部企画部クリエイター、フューチャーワークスタイル戦略部社員)により検証した。

全数通して、3D プリント製造方法の制約、材料特性に基づく：

- ・ 塞がってほしい面の形成が 3D プリントの制約で実現できない
- ・ 素材が硬質のため座り心地に直結する座面、背面に形成するカーブが重要となる。それが形態形成の制約なのか、設計力で補えるのかさらなる実験が必要
- ・ 着座の時に出る音が気になる

などの指摘があったが、

- ・ 表面の仕上がり感が想定よりも美しく、特有の個性となっている。
- ・ クッション性やスライドなど動きを生み出す構造に注目出来る

など新たな可能性も見いだされた。

個々の椅子についての評価を、製造実験結果と共に(資料 2-2)内に示す。個別には製造実験番号#19 が、最も 3D プリント椅子製造の制約内で実用性があるとの評価だった。またほかにもいくつか座面・背面カーブの設計改良により座り心地、全体の美しさの改善が期待できるものがあった。

今後の課題としては

- ・ スタイル(椅子の魅力)のポイントとなる曲面の美しさの追求
- ・ 座面の角度、姿勢の支え角度などの指標数値上の評価
- ・ カラーリングの模索
- ・ 耐久性能などの構造の問題解決

がある。3D プリンティング技術の特性を活かしたデザインを検討し、出力効率(時間、材料と出力工程)とデザインのバランスによる成型技術の限界を確認しながら、3D プリンティング家具の製造要件を固めていくことが必要である。

本年度は、3D プリントによる椅子形状の可能性を見るための実験であったが、次年度は、バイオ PE コンパウンドを材料とし、3D プリント製造の特徴を活かした椅子の設計および「個別カスタマイズ」設計手法の開発による製造実証実験と、完成した椅子の強度、耐久性、耐候性などの実用性検証を行う計画である。

2-4. 実寸椅子製造実証実験専用の大型 3D プリンタ

本椅子形状の 3D プリントに関する実証実験は、共同実施者エス.ラボ株式会社の設計・製造による 2 メートル造形サイズを有する本実証事業専用 3D プリンタ GEMLAA GD を利用した。その仕様と設計図を(資料 2-4)に示す。

次年度からは、バイオポリエチレン (PE) コンパウンドを材料とした実寸椅子製造実証実験に利用する。

(資料2-1)

市販ポリエチレン製並びにこれに類する樹脂製の屋外型家具製品の形状調査報告書

調査概要: バイオPE材料AM椅子製作のため、既存屋外型PEおよび樹脂製椅子の調査を行う

調査方針: サポートの着かない、FDMに適したデザインを中心に調査を行う。

サンプル数: 50

製品名目次

1	Sam Son	26	Stones Sofa
2	RAVIOLO	27	Mamma Rocking Chair
3	SIGN MATT	28	Casalino Children's Chair
4	BEEKAT chair	29	Stacking Patio Dining Chair
5	BEEKAT chair	30	FAUTEUIL ESPRIT
6	Clover arm chair	31	Spun Chair
7	Panton Chair	32	True Love Outdoor
8	Riptide Chair	33	Loop Outdoor Bench
9	Huey 16 Rocker	34	Moon Chair
10	Outdoor Chair	35	Flip stool
11	CHAISE.PI	36	Rocking chair
12	Orgone Chair	37	Voido
13	Felt chair	38	Efebo Hocker
14	Jux Bar Stool	39	Garden Party Stuhl
15	Outdoor Lounge Chair	40	Asymmetrical Strip
16	WL&T Chair	41	Woopy
17	GAIJIN CHAIR	42	Barrel Chair
18	Flip chair	43	Vertex Chair
19	S1	44	Vertex Bar Stool
20	SURF Sun Chaise Lounger	45	UFO Bar Stool
21	Tokyo Pop Dormeuse Chair	46	UFO Lounge Chair
22	Tokyo Pop Sofa	47	Bucky
23	Tokyo Pop Armchair	48	wing stool
24	Faz Sunlounger	49	TRIOLI
25	Orgone Marc Newson Chaise Longue	50	BEEKAT chair



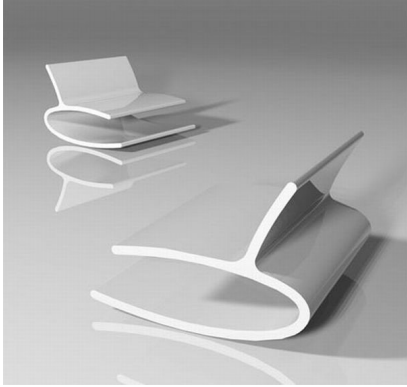
素材	-	
製品名	CHAISE.PI	
メーカー		
デザイナー		
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	370
	D	650
	H	850
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面厚の調整 ・側面を底面として造形	

1



素材	-	
製品名	GAIJIN CHAIR	
メーカー		
デザイナー	Jeff Thornton	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	-
	D	-
	H	-
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面厚の調整 ・側面を底面として造形	

2



素材
製品名 Rocking chair
メーカー
デザイナー Zheng Ruixin
リンク <https://00m.in/bcQzS>
サイズ w
D
H
3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・側面厚の調整
- ・側面を底面として造形
- ・側面パスにジグザグ構造を挿入



素材 PE
製品名 SIGN MATT
メーカー Magis
デザイナー Piergiorgio Cazzaniga
リンク <https://00m.in/bcQzS>
サイズ w 480
D 515
H 745
3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・側面厚の調整
- ・オーバーハング角の除去
- ・側面を底面として造形



素材	-	
製品名	WL&T Chair	
メーカー		
デザイナー	Marc Newson	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	490
	D	600
	H	810
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・側面補強構造を挿入 ・側面を底面として造形	

5



素材	PU	
製品名	S1	
メーカー		
デザイナー	Pieter Jamart	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	600
	D	710
	H	410
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・側面補強構造を挿入 ・側面を底面として造形	

6



素材	PU	
製品名	Flip stool	
メーカー	sixinch	
デザイナー	Daisuke Motogi	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	460
	D	780
	H	660
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・側面補強構造を挿入 ・側面を底面として造形	

7



素材	FRP	
製品名	Garden Party Stuhl	
メーカー	Essman KG	
デザイナー	Luigi Colani	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	760
	D	800
	H	720
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・側面補強構造を挿入 ・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

8



素材	PE	
製品名	Outdoor Lounge Chair	
メーカー		
デザイナー	Vondom Doux	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	920
	D	800
	H	890
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・側面補強構造を挿入 ・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

9



素材	PE	
製品名	Voido	
メーカー	Magis	
デザイナー	Ron Arad	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	580
	D	1140
	H	780
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面厚の調整 ・側面二重構造の回避 ・側面を底面として造形 ・オーバーハング角の除去	

10



素材	PE	
製品名	Lounge Chair, Cloud	
メーカー	TONIK	
デザイナー		
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	660
	D	540
	H	755
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・正面部の開放 ・オーバーハング角の除去 ・正面を底面として造形	

11



素材	FRP	
製品名	Moon Chair	
メーカー	Eero Aarnio Originals	
デザイナー	mooka	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	860
	D	810
	H	620
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・正面斜面部の開放 ・オーバーハング角の除去 ・正面斜面部を底面として造形 ・側面厚の調整	

12



素材
製品名
メーカー
デザイナー
リンク
サイズ

FRP
Asymmetrical Strip
Fabio Novembre
<https://00m.in/bcQzS>
w
D
H

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・側面部の開放
- ・側面パスにジグザグ構造を挿入
- ・オーバーハング角の除去
- ・側面を底面として造形

13



素材
製品名
メーカー
デザイナー
リンク
サイズ

FRP
Mamma Rocking Chair
Patrick Messier
<https://00m.in/bcQzS>
w
D
H

665
1170
950

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・側面厚の調整
- ・オーバーハング角の除去
- ・側面を底面として造形

14



素材	PP	
製品名	Panton Chair	
メーカー	Vitra	
デザイナー	Verner Panton	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	500
	D	830
	H	410
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

15



素材	PE	
製品名	Huey 16 Rocker	
メーカー	TONIK	
デザイナー		
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	650
	D	1020
	H	1040
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面厚の調整 ・側面を底面として造形 ・側面パスにジグザグ構造を挿入 ・側面を底面として造形	

16



素材	PE	
製品名	Riptide Chair	
メーカー	TONIK	
デザイナー		
リンク	http://bit.do/fhEyW	
サイズ	w	1060
	D	855
	H	840
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・正面部の開放 ・背面部の平坦化 ・背面を底面として造形	

17



素材	EPS	
製品名	Flip chair	
メーカー		
デザイナー	Daisuke Motogi	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	430
	D	830
	H	930
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・側面部の開放 ・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・	

18



素材	PE	
製品名	Vertex Chair	
メーカー	Vondom	
デザイナー	Karim Rashid	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	530
	D	530
	H	860
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

19



素材	PE	
製品名	wing stool	
メーカー	A-cero	
デザイナー	http://bit.do/fhERr	
リンク		
サイズ	w	450
	D	380
	H	870
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

20



素材	PE	
製品名	Jux Bar Stool	
メーカー		
デザイナー	TONIK	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	457
	D	432
	H	864
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

21



素材	PE	
製品名	Vertex Bar Stool	
メーカー	Vondom	
デザイナー	Karim Rashid	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	400
	D	410
	H	870
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形	

22



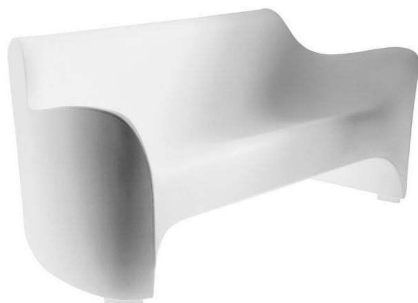
素材	PE	
製品名	UFO Bar Stool	
メーカー	Vondom	
デザイナー	Ora Ito	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	410
	D	410
	H	710
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ オーバーハング角の除去 ・ 側面を底面として造形 ・ 側面部の開放	

23



素材	PE	
製品名	Stones Sofa	
メーカー	Vondom	
デザイナー	Stefano Giovannoni	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	820
	D	940
	H	750
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ オーバーハング角の除去 ・ 側面を底面として造形 ・ 側面部の開放	

24



素材	PE	
製品名	Tokyo Pop Sofa	
メーカー	Driade	
デザイナー	Tokujin Yoshioka	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	1770
	D	780
	H	760

3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・側面部の開放 ・側面部の平坦化
----------------------	--

25



素材	PE	
製品名	Tokyo Pop Armchair	
メーカー	Driade	
デザイナー	Tokujin Yoshioka	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	860
	D	780
	H	760

3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・側面部の開放 ・側面部の平坦化
----------------------	--

26



素材	-
製品名	Faz Sunlounger
メーカー	Vondom
デザイナー	Ramón Esteve
リンク	https://00m.in/bcQzS
サイズ	w 700
	D 2040
	H 420
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ オーバーハング角の除去 ・ 側面を底面として造形 ・ 側面部の開放 ・ 側面部の平坦化

27



素材	PE
製品名	Woopy
メーカー	B-LINE
デザイナー	Karim Rashid
リンク	https://00m.in/bcQzS
サイズ	w 763
	D 640
	H 852
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ オーバーハング角の除去 ・ 側面を底面として造形 ・ 側面部の開放 ・ 側面部の平坦化

28



素材	PE	
製品名	Nest Armchair	
メーカー	Moroso	
デザイナー	Tord Boontje	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	660
	D	690
	H	770

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・オーバーハング角の除去
- ・側面を底面として造形
- ・側面部の開放
- ・側面部の平坦化

29



素材	PE	
製品名	Barrel Chair	
メーカー	Heller	
デザイナー	Frank Gehry	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	990
	D	861
	H	683

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・オーバーハング角の除去
- ・側面を底面として造形
- ・側面部の開放
- ・側面部の平坦化

30



素材	PE	
製品名	Outdoor Chair	
メーカー	JIBE	
デザイナー		
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	660
	D	540
	H	755
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・側面部の開放 ・側面部の平坦化	

31



素材	PE	
製品名	Stacking Patio Dining Chair	
メーカー	Rotomold	
デザイナー		
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	490
	D	320
	H	430
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・側面部の開放 ・側面部の平坦化	

32



素材	PE	
製品名	Bucky	
メーカー	Löffler	
デザイナー	Marc Newson	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	1120
	D	1030
	H	540
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ オーバーハング角の除去 ・ 正面を底面として造形 ・ 正面部の開放	

33



素材	PE	
製品名	Loop Outdoor Bench	
メーカー		
デザイナー	busk+hertzog	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	1800
	D	500
	H	400
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・ 背面を底面として造形 ・ 正面部の開放 ・ 背面部の平坦化	

34



素材	FRP	
製品名	TRIOLI	
メーカー	Magis	
デザイナー	Eero Aarnio	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	496
	D	450
	H	580
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・底面を底面として造形 ・背面取っ手部の除去 ・座面の一筆書きパスによる形成	

35



素材	ABS	
製品名	Casalino Children's Chair	
メーカー	Casala	
デザイナー	Alexander Begge	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	360
	D	320
	H	525
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・オーバーハング角の除去 ・側面を底面として造形 ・側面部の開放 ・側面部の平坦化	

36



素材	PE	
製品名	SURF Sun Chaise Lounger	
メーカー	Vondom	
デザイナー	Karim Rashid	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	900
	D	2000
	H	900

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・オーバーハング角の除去
- ・座面を底面として造形

36

37



素材	FRP	
製品名	Orgone Marc Newson Chaise Longue	
メーカー	Cappellini	
デザイナー	Marc Newson	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	740
	D	1810
	H	500

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

- ・オーバーハング角の除去
- ・座面を底面として造形
- ・座面の一筆書きパスによる形成
- ・脚部の一体化

38



素材	PE	
製品名	Tokyo Pop Dormeuse Chair	
メーカー	Driade	
デザイナー	Tokujin Yoshioka	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	740
	D	1570
	H	790
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

39



素材	FRP	
製品名	Spun Chair	
メーカー	Magis	
デザイナー	Thomas Heatherwick	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	950
	D	950
	H	650
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

40



素材 PE
 製品名 True Love Outdoor
 メーカー
 デザイナー busk+hertzog
 リンク <https://00m.in/bcQzS>
 サイズ

w 960
 D 710
 H 700

3Dプリントの為の
 変更項目・メモ
 ・3Dプリントは難しい
 ・
 ・

41



素材 PE
 製品名 RAVIOLO
 メーカー Magis
 デザイナー Ron Arad
 リンク <https://00m.in/bcQzS>
 サイズ

w 695
 D 565
 H 770

3Dプリントの為の
 変更項目・メモ
 ・3Dプリントは難しい
 ・
 ・

42



素材
製品名
メーカー
デザイナー
リンク
サイズ

PE
Clover arm chair
Driade
Verner Panton
<https://00m.in/bcQzS>

w 660
D 540
H 755

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

・3Dプリントは難しい
・
・

43



素材
製品名
メーカー
デザイナー
リンク
サイズ

PE
UFO Lounge Chair
Vondom
Ora Ito
<https://00m.in/bcQzS>

w 1327
D 1022
H 572

3Dプリントの為の
変更項目・メモ

・3Dプリントは難しい
・
・

44



素材	FRP	
製品名	Felt chair	
メーカー		
デザイナー	Marc Newson	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	650
	D	830
	H	1070
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

45



素材	PE	
製品名	Orgone Chair	
メーカー		
デザイナー	Marc Newson	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	810
	D	960
	H	1080
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

46



素材	Efebo Hocker	
製品名	Artemide	
メーカー	Stacy Dukes	
デザイナー	https://00m.in/bcQzS	
リンク		
サイズ	w	470
	D	480
	H	400
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい ・ ・	

47



素材	FRP	
製品名	FAUTEUIL ESPRIT	
メーカー		
デザイナー	Danielle Quarante	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	720
	D	770
	H	850
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい ・ ・	

48



素材	PE	
製品名	Sam Son	
メーカー	Magis	
デザイナー	Konstantin Grcic	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	1000
	D	770
	H	700
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

49



素材	PP	
製品名	BEEKAT chair	
メーカー	BARCELONA DD BY RESOL	
デザイナー	JOSEP LLUSCÀ	
リンク	https://00m.in/bcQzS	
サイズ	w	560
	D	555
	H	790
3Dプリントの為の 変更項目・メモ	・3Dプリントは難しい	
	・	
	・	
	・	

50

(資料2-2)

3Dプリント実寸椅子の設計・製造(22脚)報告書

#1



素材 **PE**
 製品名 Lounge Chair, Cloud
 メーカー TONIK
 デザイナー
 サイズ w 660
 D 540
 H 755

3Dデータ <https://a360.co/392OdZD>

材料量 9985g

出力時間 12h44m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 背面の構造を無くし、一筆書きでの造形に適した形状に変更
 上部・下部のシェルが付着する形であれば強度は更に高まる
 座り心地は良好



評価 ・背の形成がイスの魅力を出すには必要
 ・前後面に形成の代わりにリブ造形などによる強化が必要

#2



素材 **PP**
 製品名 Panton Chair
 メーカー Vitra
 デザイナー Verner Panton
 サイズ w 500
 D 830
 H 410

3Dデータ <https://a360.co/37Y4HC7>

材料量 5874g

出力時間 8h45m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 強度を高めるため支えの構造を加える
 思ったよりも強度が出ず、構造に工夫が必要



評価 ・座り心地・強度に重要な各所のカーブの追求が必要

#3



素材 -
 製品名 WL&T Chair
 メーカー
 デザイナー Marc Newson
 サイズ w 490
 D 600
 H 810

3Dデータ <https://a360.co/2ul0nhV>

材料量 5699g

出力時間 8h30m

コメント 単一シェルと架橋構造の組み合わせで強度を担保
 曲がりの部分の中心にも架橋構造を入れるべきだった
 大きな断面と細いノズルの組合せではこの構造は有効と言える



評価 ・形態の魅力と座り心地のたまに背カーブの形成が必要
 ・思った以上に強度感があるが重いのが問題
 ・側面部の形成がほしいところ

#4



素材 FRP
 製品名 Asymmetrical Strip
 メーカー
 デザイナー Fabio Novembre
 サイズ w
 D
 H
 H

3Dデータ <https://a360.co/37XbPim>

材料量 6250g

出力時間 9h20m

コメント 45°の制限とこのデザインの妥協点を見つけるのは困難
 片側の肘掛を45°でデザインすると肘掛としての機能を失う
 異なる部分の OUTER SHELL 同士を付着させ構造を強くした
 両端にリブを入れ、単一シェルでも十分な強度が出た



評価 ・形態の表現が不十分
 ・背上端のR形状形成ができるとよい
 ・側面部の形成がほしいところ

#5



素材 **FRP**
 製品名 Moon Chair
 メーカー Eero Aarnio Originals
 デザイナー mooka
 サイズ w 860
 D 810
 H 620

3Dデータ <https://a360.co/2RUphOc>

材料量 9986g

出力時間 14h52

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 背面の構造を無くし、一筆書きでの造形に適した形状に変更
 その結果オリジナルが持つフォルムから遠くなってしまった



評価 ・背の造形が欲しいところ
 ・プリント上の制約があるならば、異なるデザインが必要

#6



素材 **PE**
 製品名 Loop Outdoor Bench
 メーカー
 デザイナー busk+hertzog
 サイズ w 1800
 D 500
 H 400

3Dデータ <https://a360.co/2uY5oNt>

材料量 9231g

出力時間 13h46m

コメント 単一シェルで内部構造の強度担保にトライ
 シェル同士の付着が上手くいかず十分な強度が出なかった
 もう少しオリジナルのデザインに近づける方法あり



評価 ・デザイン要素で重要なオーバルの断面が形成できず残念
 ・強度に不安がある

#7



素材 **PE**
 製品名 SURF Sun Chaise Lounger
 メーカー Vondom
 デザイナー Karim Rashid
 サイズ w 900
 D 2000
 H 900

3Dデータ <https://a360.co/31mxmP3>

材料量 4753g

出力時間 7h5m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 置き型のためそれ程設計に苦労はしていない
 もう少し丸みを帯びたデザインに出来そう
 スタッキングチェアにしても良さそう



評価 ・形態表現が不十分
 ・座り心地に重要なカーブの検討が必要
 ・強度をどう保つか検討が必要

#8



素材 **PE**
 製品名 Stones Sofa
 メーカー Vondom
 デザイナー Stefano Giovannoni
 サイズ w 820
 D 940
 H 750

3Dデータ <https://a360.co/39bY6Vb>

材料量 8094g

出力時間 12h3m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 もう少し座面・背面の丸みを出しても良かった



評価 ・断面形状が十分表現されていない。
 ・センター割で左右を造形して、二次加工で接着するなど?

#9



素材 -
 製品名 -
 メーカー (formnext2019にて展示)
 デザイナー -
 サイズ w -
 D -
 H -

3Dデータ <https://a360.co/2GQZfp1>
 材料量 10307g
 出力時間 15h24m
 コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 各所の曲げ構造が十分な強度を与えている
 FDM3DP椅子に最も適した構造の一つと言える



評価 ・再現性は高い
 ・硬質だが座り心地は悪くない

#10



素材 -
 製品名 -
 メーカー (近畿大学キャンパス内に設置)
 デザイナー -
 サイズ w -
 D -
 H -

3Dデータ <https://a360.co/394cKxy>
 材料量 8713g
 出力時間 12h59m
 コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 意匠性と強度向上のためにも両端に曲げをいれても良かった
 スケールをオリジナルより小さめに造形



評価 ・幅の変化、カーブなどのスタイルの追求が必要
 ・座った時にベンディングがあり。3DPならではの特性あり?
 ・強度上不安がある。

#11



素材 -
 製品名 -
 メーカー (TCT Asia 2019にて展示)
 デザイナー -
 サイズ w -
 D -
 H -

3Dデータ <https://a360.co/2RVsVYI>

材料量 17092g

出力時間 17h26m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 各所の曲げ構造が十分な強度を与えている
 FDM3DP椅子に最も適した構造の一つと言える
 大きいサイズで作ってしまった

評価 ・再現性は高い
 ・座り心地は悪くない



#12



素材 PE
 製品名 Outdoor Lounge Chair
 メーカー Vondom Doux
 デザイナー
 サイズ w 920
 D 800
 H 890

3Dデータ <https://a360.co/3b8reyj>

材料量 12673g

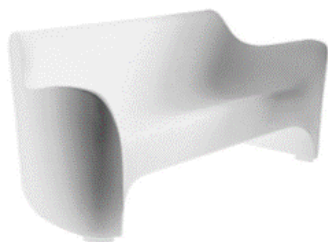
出力時間 12h56h

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 45°の制限により思ったよりも肘掛の角度が取れなかった
 座り心地はかなり良好

評価 ・形態のバランス(美しさの)追求が必要
 ・座り心地に影響のあるカーブ表現ができていない
 ・座り心地は悪くない



#13



素材 PE
製品名 Tokyo Pop Sofa
メーカー Driade
デザイナー Tokujin Yoshioka
サイズ w 1770
D 780
H 760



3Dデータ <https://a360.co/2u7Rokc>
材料量 13833g
出力時間 14h8m
コメント 2重シェルを使用して強度を高める
一筆描き制限によりオリジナルのフォルムから離れてしまう
中心部分にかなり強い架橋構造を入れている
結果、大人二人が座っても十分な強度がある

評価 ・下肢に触れる部分が端面でなくR状が望ましい
・背の高さが足りない
・座面、背面カーブが必要

#14



素材 FRP
製品名 Orgone Marc Newson Chaise Longue
メーカー Cappellini
デザイナー Marc Newson
サイズ w 740
D 1810
H 500



3Dデータ <https://a360.co/2OoEaq7>
材料量 9003g
出力時間 9h12m
コメント 2重シェルを使用して強度を高める
中心部分にかなり強い架橋構造を入れている
大人二人が座っても十分な強度がある
もう少し丸みのある意匠にできたと感じる

評価 ・ベンチの意匠としては評価でき強度も安定している
・オリジナルを3Dプリントで再現するには無理がある
・オリジナルとは異なるがベンチとして成り立つ意匠である

#15



素材 PU
製品名 Flip stool
メーカー sixinch
デザイナー Daisuke Motogi
サイズ w 430
D 755
H 656

3Dデータ <https://a360.co/2PpYXKj>
材料量 9113g
出力時間 9h19m
コメント 2重シェルを使用して強度を高める
力の加わりそうな部分に架橋構造を加える
オリジナルにかなり近いものが出来た



評価 ・上下のシェルのバランスが悪い
・カーブが再現されてなく座り心地に影響する

#16



素材 FRP
製品名 TRIOLI
メーカー Magis
デザイナー Eero Aarnio
サイズ w 496
D 450
H 580

3Dデータ <https://a360.co/3c1iUAK>
材料量 5327g
出力時間 6h6m
コメント 単一シェルと架橋構造の組合せ
軽くて強度も十分にある
包まれる座り心地が思ったよりも良い



評価 ・背の形態が必要
・軽快なフォルム、全体の美しいバランスの実現が必要

#17



素材 **FRP**
 製品名 Garden Party Stuhl
 メーカー Essman KG
 デザイナー Luigi Colani
 サイズ w 760
 D 800
 H 720

3Dデータ <https://a360.co/37ZnQmH>
 材料量 13413g
 出力時間 9h35m
 コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 オリジナルにかなり近いものが出来た



評価 ・背のカーブが必要
 ・座り心地は今ひとつ

#18



素材 -
 製品名 GAIJIN CHAIR
 メーカー -
 デザイナー Jeff Thornton
 サイズ w -
 D -
 H -

3Dデータ <https://a360.co/3a6el12>
 材料量 15054g
 出力時間 10h57m
 コメント 単一シェルと架橋構造の組合せ
 アウターシェル同士を付着させ構造を強くすべきであった
 座るには強度不足
 フォームはそれなりにオリジナルに近いものになった



評価 ・同一断面の(押出形状)成形で3Dプリントでも再現性は高い
 ・全体として魅力に欠ける。

#19



素材 PE
 製品名 SIGN MATT
 メーカー Magis
 デザイナー Piergiorgio Cazzaniga
 サイズ w 480
 D 515
 H 745

3Dデータ <https://a360.co/2w8k8cR>
 材料量 6535g
 出力時間 6h41m
 コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 オリジナルにかなり近いものが出来た



評価 ・再現性は高い
 ・意匠性・座り心地に重要なカーブの造形が必要

#20



素材 PE
 製品名 Raviolo
 メーカー Magis
 デザイナー Ron Arad
 サイズ w 695
 D 655
 H 770

3Dデータ <https://a360.co/3a5OQCq>
 材料量 8988g
 出力時間 9h12m
 コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 背面の構造を無くし、一筆書きでの造形を実現
 その反面、肘掛部分が浮いてしまった



評価 このスタイルで背のない造形だと椅子の価値が出ない

#21



素材 **PLA**
 製品名 -
 メーカー SFC
 デザイナー Toki Hamasaki
 サイズ w 525
 D 500
 H 537

3Dデータ <https://a360.co/2SkoXr2>

材料量 7892g

出力時間 11h45m

コメント 2重シェルを使用して強度を高める
 曲げ構造を多数加え、かなりの強度がある
 製作者オリジナルのもの



評価 ・ペンディングによるクッション性は注目だが強度の不安がある
 ・変形時に強度不安のない構造の創造が必要

#22



素材 **PLA**
 製品名 -
 メーカー SFC
 デザイナー Toki Hamasaki
 サイズ w 525
 D 500
 H 537

3Dデータ <https://a360.co/2SXUDnA>

材料量 13970g

出力時間 14h17m

コメント 縦方向の造形で座面を作るトライ
 見た目以上に普通に座れる
 同心円同士を繋ぐ架橋構造を十字に入れた方が良かった



評価 ・成形トライアルとして家具に生かせる造形
 ・イスとするかテーブルとするか
 ・製造時間がやや掛かりすぎ

(資料 2-3) 3D プリント実寸椅子の設計・製造(22 脚)データ・ファイル一覧

3D モデル(STL)、造形データ(G-code)、造形条件設定(factory)ファイル

環境省椅子3Dプリント実寸椅子の設計製造報告			
名前	サイズ	変更日	種類
▼ 椅子データ	--	一昨日 12:00	フォルダ
1.gcode	7 MB	2020年2月26日 16:20	Unix 実行ファイル
1.stl	4.4 MB	2020年2月26日 14:30	Unix 実行ファイル
2.gcode	6.5 MB	2019年12月1日 22:07	Unix 実行ファイル
2.stl	10.8 MB	2020年2月26日 15:17	Unix 実行ファイル
3.gcode	5.5 MB	2019年12月2日 20:59	Unix 実行ファイル
3.stl	900 KB	2020年2月26日 15:17	Unix 実行ファイル
4.gcode	3.3 MB	2019年12月21日 17:32	Unix 実行ファイル
4.stl	586 KB	2020年2月26日 15:18	Unix 実行ファイル
5.gcode	7.8 MB	2019年12月22日 14:31	Unix 実行ファイル
5.stl	4.7 MB	2020年2月26日 16:08	Unix 実行ファイル
6.gcode	11.7 MB	2019年12月23日 17:17	Unix 実行ファイル
6.stl	1.3 MB	2020年2月26日 16:09	Unix 実行ファイル
7.gcode	1.5 MB	2019年12月24日 10:09	Unix 実行ファイル
7.stl	220 KB	2020年2月26日 16:09	Unix 実行ファイル
8.gcode	4.7 MB	2020年1月11日 12:15	Unix 実行ファイル
8.stl	1.7 MB	2020年2月26日 16:10	Unix 実行ファイル
9.gcode	12 MB	2020年1月12日 17:52	Unix 実行ファイル
9.stl	12.7 MB	2020年2月26日 16:10	Unix 実行ファイル
10.gcode	7 MB	2020年1月14日 15:02	Unix 実行ファイル
10.stl	527 KB	2020年2月26日 16:10	Unix 実行ファイル
11.gcode	15.1 MB	2020年1月25日 11:50	Unix 実行ファイル
11.stl	15.3 MB	2020年2月26日 16:11	Unix 実行ファイル
12.gcode	11.8 MB	2020年1月24日 15:55	Unix 実行ファイル
12.stl	8.3 MB	2020年2月26日 16:12	Unix 実行ファイル
13.gcode	6.9 MB	2020年1月26日 16:25	Unix 実行ファイル
13.stl	1.8 MB	2020年2月26日 16:12	Unix 実行ファイル
14.gcode	2.8 MB	2020年1月27日 13:37	Unix 実行ファイル
14.stl	1.1 MB	2020年2月26日 16:12	Unix 実行ファイル
15.gcode	6.7 MB	2020年2月5日 20:06	Unix 実行ファイル
15.stl	316 KB	2020年2月26日 16:13	Unix 実行ファイル
16.gcode	1.7 MB	2020年2月9日 19:17	Unix 実行ファイル
16.stl	938 KB	2020年2月26日 16:13	Unix 実行ファイル
17.gcode	14.7 MB	2020年2月10日 12:26	Unix 実行ファイル
17.stl	11 MB	2020年2月26日 16:19	Unix 実行ファイル
18.gcode	5.6 MB	2020年2月12日 1:44	Unix 実行ファイル
18.stl	214 KB	2020年2月26日 16:20	Unix 実行ファイル
19.gcode	6.3 MB	2020年2月21日 21:29	Unix 実行ファイル
19.stl	7 MB	2020年2月26日 16:20	Unix 実行ファイル
20.gcode	7.5 MB	2020年2月22日 13:26	Unix 実行ファイル
20.stl	7.6 MB	2020年2月26日 16:20	Unix 実行ファイル
21.gcode	22.1 MB	2020年1月23日 12:30	Unix 実行ファイル
21.stl	5.4 MB	2020年2月26日 16:21	Unix 実行ファイル
22.gcode	13.9 MB	2020年2月23日 17:02	Unix 実行ファイル
22.stl	757 KB	2020年2月26日 16:21	Unix 実行ファイル
量nozzle5.0pitch0.2.factory	73 KB	2020年1月23日 17:30	Unix 実行ファイル
量nozzle5.0pitch0.25.factory	437 KB	2020年1月29日 15:01	Unix 実行ファイル
環境省椅子3Dプリント実寸椅子の設計製造報告書.pdf	1.2 MB	今日 16:55	PDF 書類
環境省椅子3Dプリント実寸椅子の設計製造報告書.xlsx	7.4 MB	今日 16:52	Microsoft Excel ブック

(資料2-4) 実寸家具製造実験専用大型3Dプリンタ 仕様

型式	GEMLAA GD
本体寸法	横3,960mm×奥行2,100mm×高さ2,300mm
造形寸法	横2,100mm×奥行1,000mm×高さ1,000mm
本体重量	約2,000Kg
入力電源	AC200V 三相 12kVA 程度
造形方法	熱融解積層方式（FDM方式）
駆動モーター	サーボモーター
XY最大移動速度	300mm/s
軸ガイド方式	全軸リニアガイド
ノズル数	2
吐出方式	ギヤポンプ付きフルフライトスクリュー
対応ノズル径	1mm,2mm,3mm,4mm,5mm,6mm
スクリュー径	φ20mm
使用材料	原料形状 φ1～φ4程度のペレット形状
吐出能力	～5kg/h程度 ※材料・ノズル径等条件によります
ヘッド（シリンダ）温度	100℃～350℃
ヘッド加熱方式	カードリッジヒータ（各ヘッド5ZONE）
テーブル温度	最大80℃
テーブル加熱方式	ラバーヒータ
材料供給方式	別置き材料タンクからヘッドホッパーにエアでの圧送
供給エア圧	0.35～0.60MPa
操作方式	タッチパネル（PLC内臓）での操作選択、キーボード付属
外部との通信	なし、USBメモリでデータ入力可
付属スライサソフト	Simplify3D（ライセンス）
スライサへのデータ入力形式	STL形式
安全対策	保護カバー 漏電しゃ断器 過負荷防止装置 過熱防止装置 非常停止ボタン2箇所 ドア開閉インターロック

3. LCA の検証・評価

3-1. LCA の検証・評価の目的

屋外型家具従来の製造方式と、3Dプリント製造方式を比較する LCA モデルの作成を行い LCA データベース等から取得した二次データにより製品環境負荷の排出ポイント全体像の把握を行う。次に製造元への調査によりプロセスの精緻化を行い、リサイクル代替効果を含む各廃棄シナリオ別の算定を実施し、低炭素化の効果およびリサイクル性・経済性を比較検証・評価する。

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)	5kg	5kg	
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 (20%)	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	45,000 回	なし	
金型の重量	2,700kg	なし	
機械の重量	50,000kg	1,000kg	
フィラー	なし	セルロースファイバー	3D プリントのフィラーはセルロースファイバーを基準とした
		卵の殻	
		CNF	
		木質系の綿	
		グラスウール	
成形電力	2.75kWh/kg × 5kg=13.7kWh	省エネ:0.4 kW × 16h=6.4 kWh	3D プリントでは成形時間は実際に出力を行った実測時間を設定した
電力プロセス	イタリア電力	日本電力	
製造歩留まり	5%	5%	歩留まり分の処理については Post Consumer の場合と同様とした
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 の代替プロセス	一般炭の燃焼	一般炭の燃焼	熱量換算
MR	下位リサイクル	水平リサイクル	破砕、ペレット化

材料輸送	海外陸上輸送:50km	海外陸上輸送:50km 国際海上輸送:22,000km 国内陸上輸送:50km	バイオ PE はブラジル産
製品輸送	海外陸上輸送:500km 国際海上輸送:18,000km 国内陸上輸送:500km	国内陸上輸送:100km	従来型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
廃棄物輸送	国内陸上輸送:50km	国内陸上輸送:50km	市内輸送

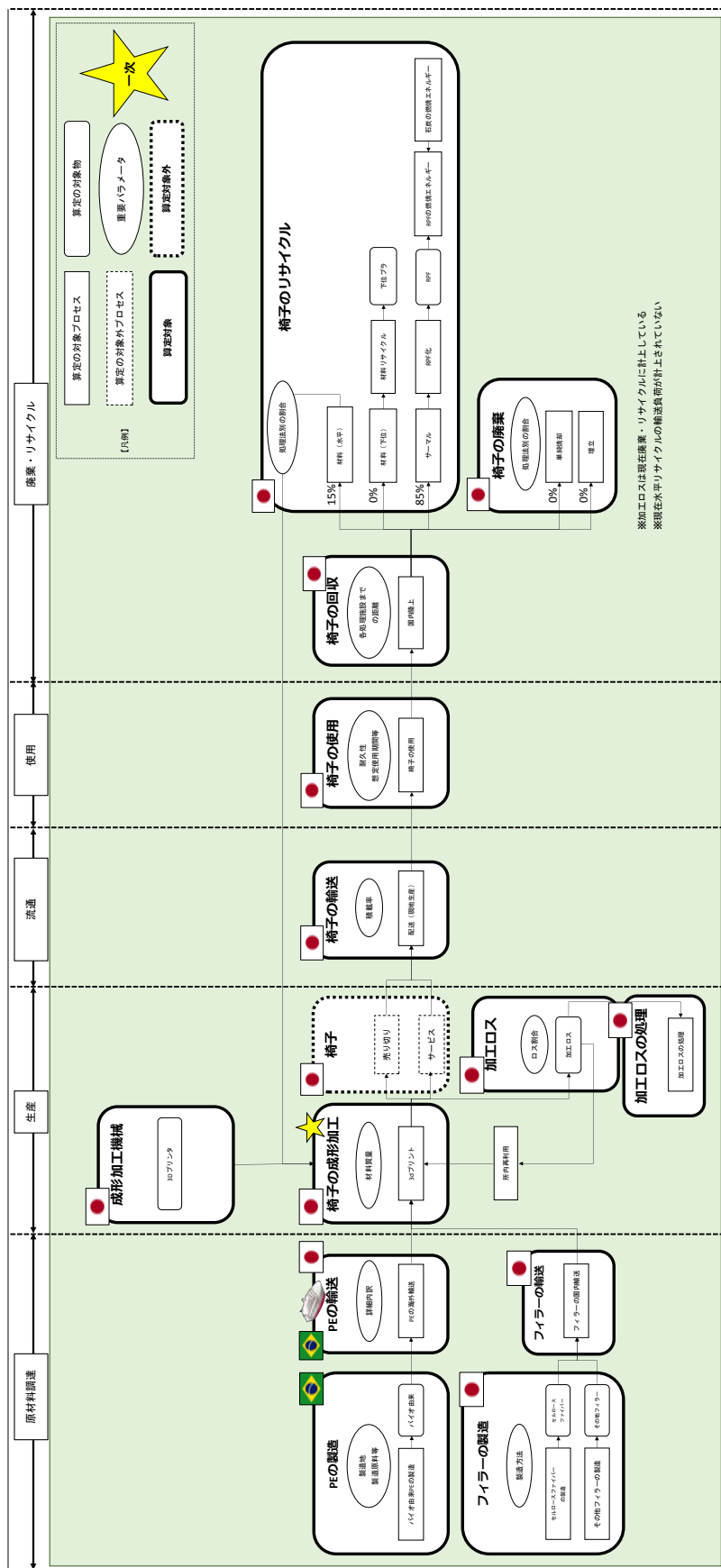


図 3-2 3D プリンタのライフサイクルフロー図

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
 - 製造機械のエネルギーロス
 - 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
		1,22
		-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。

表 3-3 バイオ PE の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	バイオ PE	1	kg
	大気中への排出	Land Use Change Credits	-1.1	kg
		CO2 Uptake	-3.14	kg
		Electricity Cogeneration Credits	-1.17	kg
		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。本文献では実寸椅子製造に用いられる 3D プリンタ同等の実験機 Tatami (造形範囲は小さいが電力消費源となる材料溶融・積層機構は同じ)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

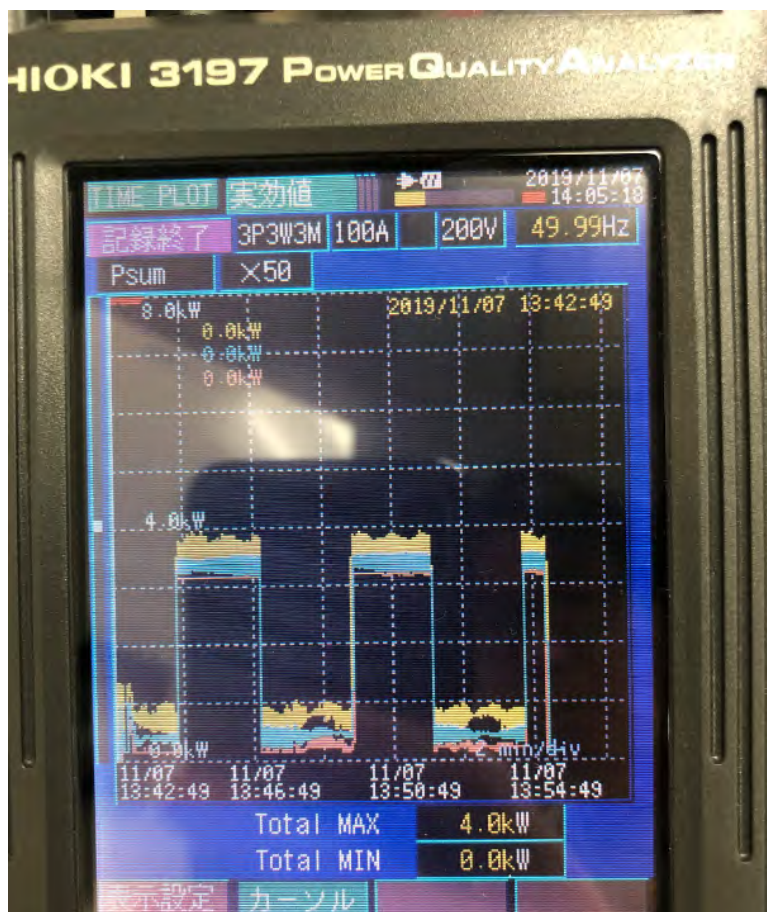


図 3-5 計測器による消費電力測定

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 16 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

$$0.4(\text{kWh/h}) \times 16(\text{h/脚}) = \underline{6.4} \text{ kWh/脚}$$

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、加工ロス率は 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 3-4 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
	加工ロス	廃プラ(Post Consumer と同じ処理)	0.25	
入力	主原料	プラスチック原料(バイオ PE)	4.2	kg
		フィラー	1.05	kg
	エネルギー	電力	6.4	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 5 種類を検討し、それぞれ文献値や計算値を用いた。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)
セルローズファイバ	-	製造負荷は [株式会社デコス 2019]より。灰分は [松藤 , 石井	0.327	10.30%	12.05 (紙と同等)

一		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。			
卵の殻	-	製造負荷は [株式会社 EPM 日付不明]より。灰分は分子式より計算し算出。熱量はなしとした。	0.194	56% $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO}$	0
CNF	-	製造負荷は [Moon, ほかに 2017]らより。灰分は [全国木材チップ工業連合 2011]より。熱量は [栗原, 山岸, 曾根 2015]より。	7.95	2%	18.6 (木材)
木質系の綿	-	製造負荷は IDEA v2 の boards less than 7.5cm depth of minimum cross section, with more than 4 times width larger than depth を利用した。灰分は CNF と同等とした。熱量は [東京農業大学 農山村支援センター 2015]より。	0.01 以下	2%	10 (バイオマス)
グラスウール	A シナリオ	製造負荷は IDEA v2 の glass fiber (tow) and its products を利用した。灰分は全量燃え残りと推計した。熱量はなしとした。A シナリオは投入されるグラスウールの発生源が家電製造からの歩留まりであり、製造負荷を家電と価値配分をしている。	0.01 以上～3 以下	100%	0
	B シナリオ	製造負荷は IDEA v2 の glass fiber (tow) and its products を利用した。灰分は全量燃え残りと推計した。熱量はなしとした。B シナリオは投入されるグラスウールの発生源が廃家電のリサイクルからの歩留まりであり、負荷は埋立を控除するため、マイナスとした。	-0.01	100%	0

添加剤として投入されるグラスウールには、調達先のシナリオが2つ考えられ、それぞれ A シナリオ、B シナリオとした。



図 3-6 A シナリオ 家電製造からの歩留まりのガラスウール



図 3-7 B シナリオ 廃家電のリサイクルからのガラスウール

A シナリオは家電製造時の歩留まりから得られるガラスウールであり、B シナリオは廃家電をリサイクルした際に得られるガラスウールである。

A シナリオの場合、ガラスウールの製造負荷を出力価値で配分することとなる。図中では家電が 10,000 円/kg で廃ガラスウールが 20 円/kg と設定したため、ガラスウール製造負荷の 1/500 が計上されることとなる。

B シナリオの場合、廃家電のリサイクル処理から生じるガラスウールであることから、ガラスウールの埋立負荷が控除されることになる。以下に全てのフィラーについて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

表 3-7 卵の殻の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	卵の殻	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	0.194	kg

表 3-8 CNF の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	CNF	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	7.95	kg

表 3-9 木質系の綿の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	木質系の綿	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	0.01	kg

表 3-10 グラスウール(A シナリオ)の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	グラスウール(A シナリオ)	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	0.01	kg

表 3-11 グラスウール(B シナリオ)の入出力表

入出力	分類	項目	値	単位
出力	製品	グラスウール(B シナリオ)	1	kg
	大気中への CO2 排出	製造負荷	-0.01	kg

3- 4-2-4. 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 3-8 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。

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

回転成形用の機械重量と使用される金型については Web 調査で、それぞれ 50,000 kg, 2,700 kg と推定し、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。製造機械については 50 年使用し、1 年で 1 万回の回転成形を行うとした。

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

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 [株式会社 SG 総研 2019]に記載の平均金型使用回数の平均値を取り、45,000 回とした。ここから

$$2,700 \text{ (kg)} / 45,000 \text{ (回)} = \underline{0.06} \text{ (kg/回)}$$

となった。この値を椅子一脚あたりの金型分の特殊鋼の重量とした。

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 3-12 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)	0.25	kg
入力	主原料	プラスチック原料(PP+PE)	5.25	kg
	エネルギー	Electricity	13.75	kWh
	資本財	製造機械(鉄)	0.10	kg
		金型(特殊鋼)	0.06	kg

3-4-2-5. 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 では破砕と 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。出力されるエネルギーについてはフィラーごとに異なるためそれぞれ計上した。また、3D プリンタへ投入されるフィラーの一部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。それぞれのフィラーの灰分を示す。

表 3-13 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%
		卵の殻	56.0%
		CNF	2.0%
		木質系の綿	2.0%
		グラスウール	100.0%

MR について、従来型は下位製品へリサイクルされ、3D プリンタは水平リサイクルされると仮定し、それぞれ破砕処理とペレット化する負荷を計上した。なお、3D プリンタは製造時の原材料とフィラーを代替するとして算定を行い、下位製品へリサイクルされたプラには環境負荷はないものとした。以下に整理した入出力表を示す。

表 3-14 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	破砕	1	kg
		RPF 化	1	kg

表 3-15 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	下位プラスチック(負荷なし)	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 3-16 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 3-17 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
		卵の殻の燃焼	0	MJ

		CNF の燃焼	18.6	MJ
		木質系の綿の燃焼	10	MJ
		グラスウールの燃焼	0	MJ
	灰分	セルロースファイバーの灰分	0.103	kg
		卵の殻の灰分	0.56	kg
		CNF の灰分	0.02	kg
		木質系の綿の灰分	0.02	kg
		グラスウールの灰分	1	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

出力されるエネルギーはフィラーによって異なる。太枠線内から使用されたフィラーのエネルギー量及び灰分を選択するものとする。

表 3-18 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 3-19 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ス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。

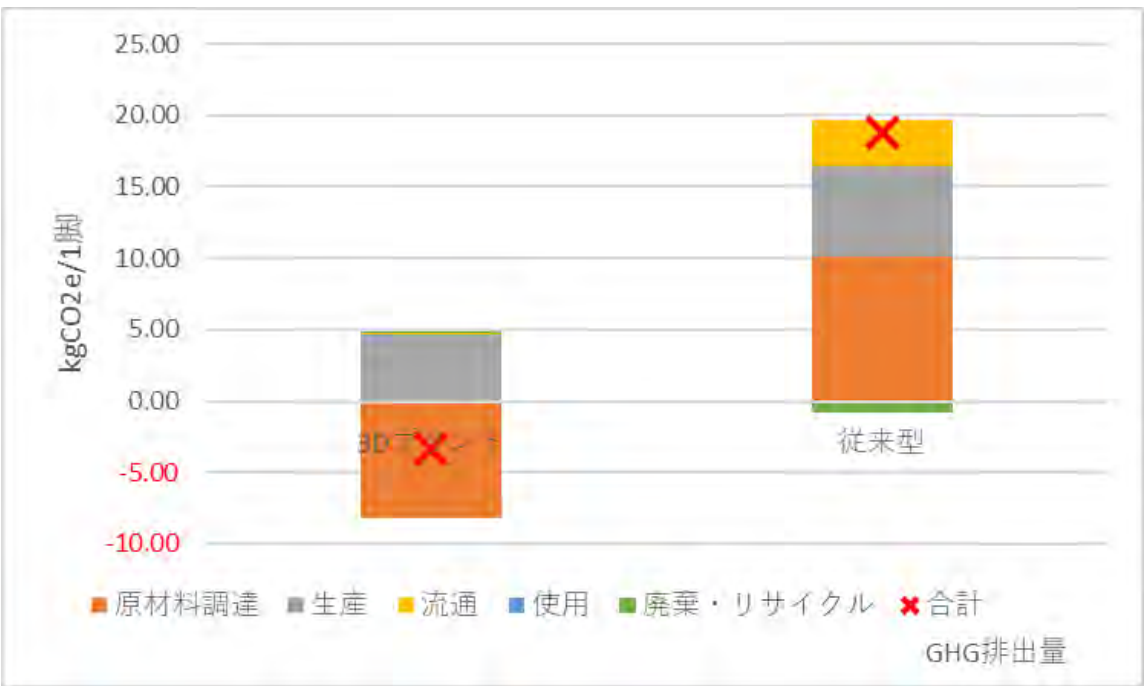


図 3-9 3D プリントと従来型の LCA 結果

表 3-20 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	-3.40	-8.18	4.65	0.07	0.00	0.06
従来型	18.82	10.09	6.39	3.12	0.00	-0.79

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。

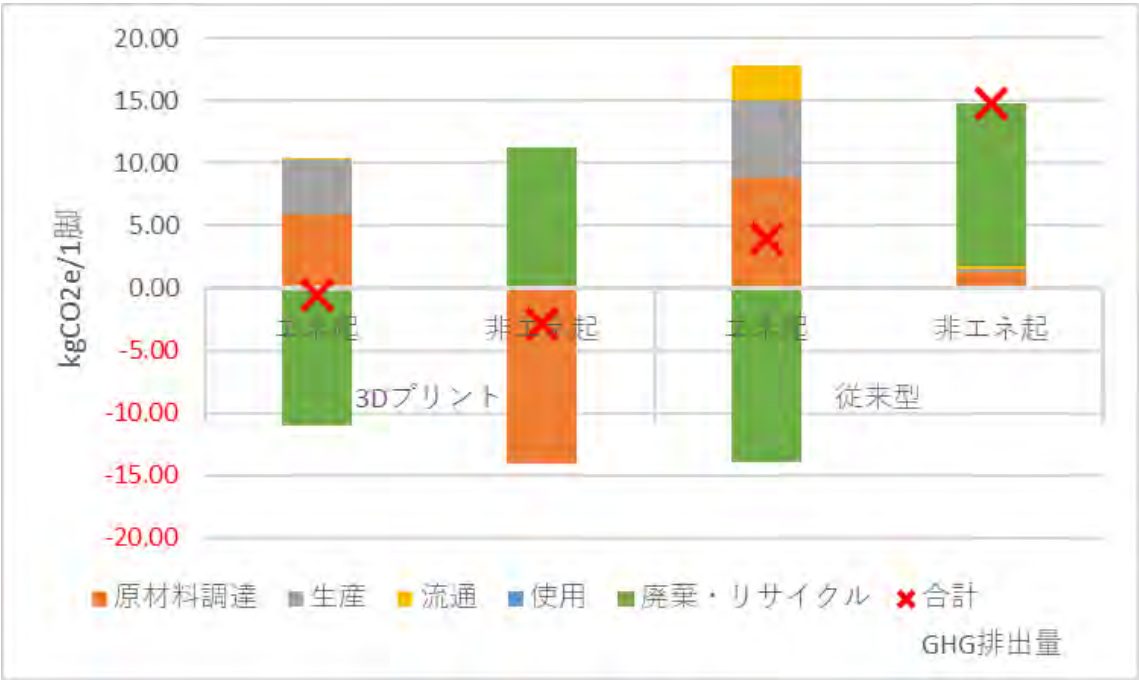


図 3-10 3D プリントと従来型のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果

表 3-21 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	-0.59	5.89	4.46	0.06	0.00	-11.00
	非エネ起	-2.81	-14.07	0.19	0.01	0.00	11.06
従来型	エネ起	3.97	8.81	6.21	2.87	0.00	-13.92
	非エネ起	14.85	1.28	0.19	0.25	0.00	13.14

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期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。

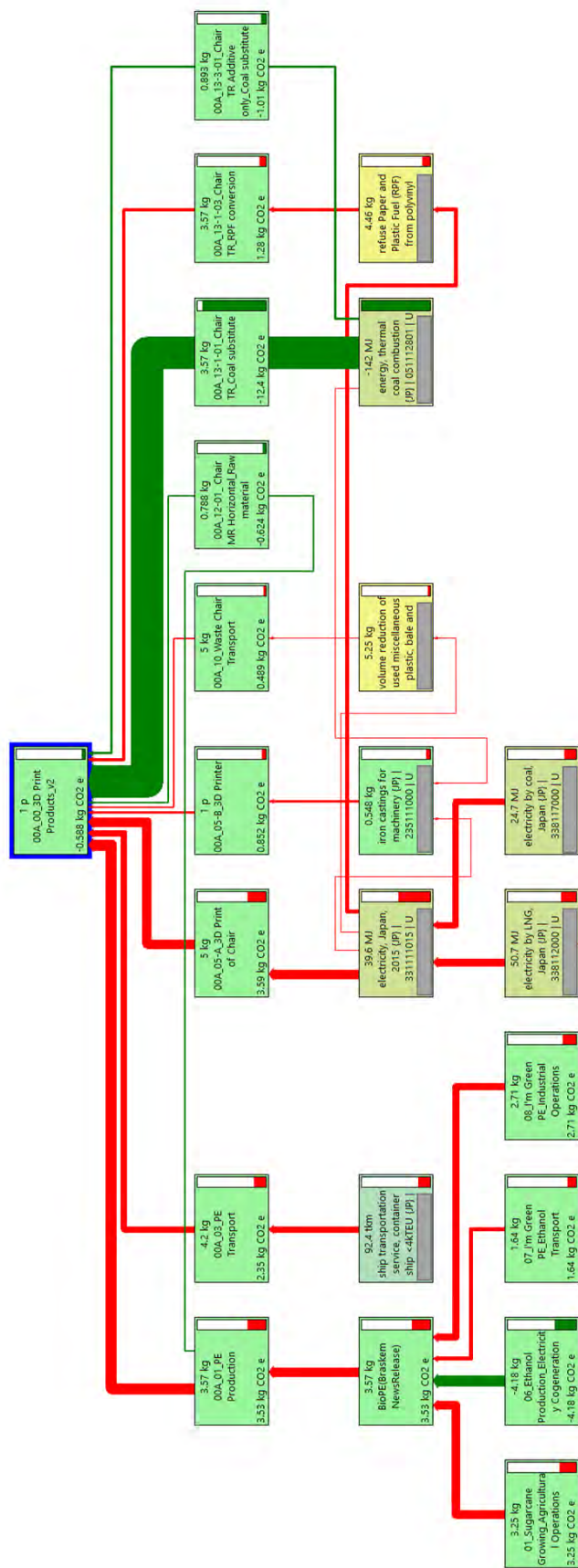


図 3-11 3D プリントのエネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 3%)

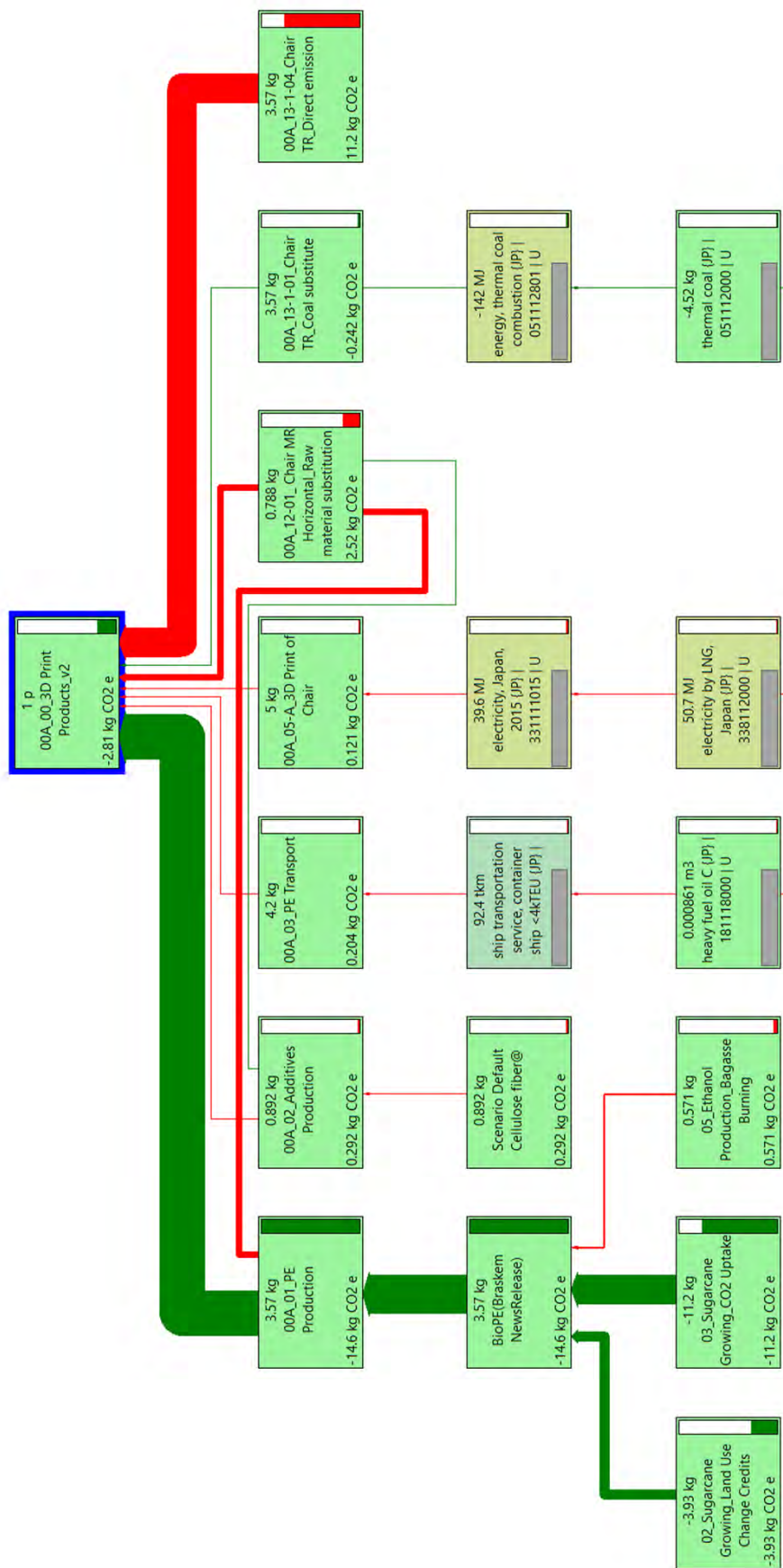


図 3-12 3D プリントの非エネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 0.5%)

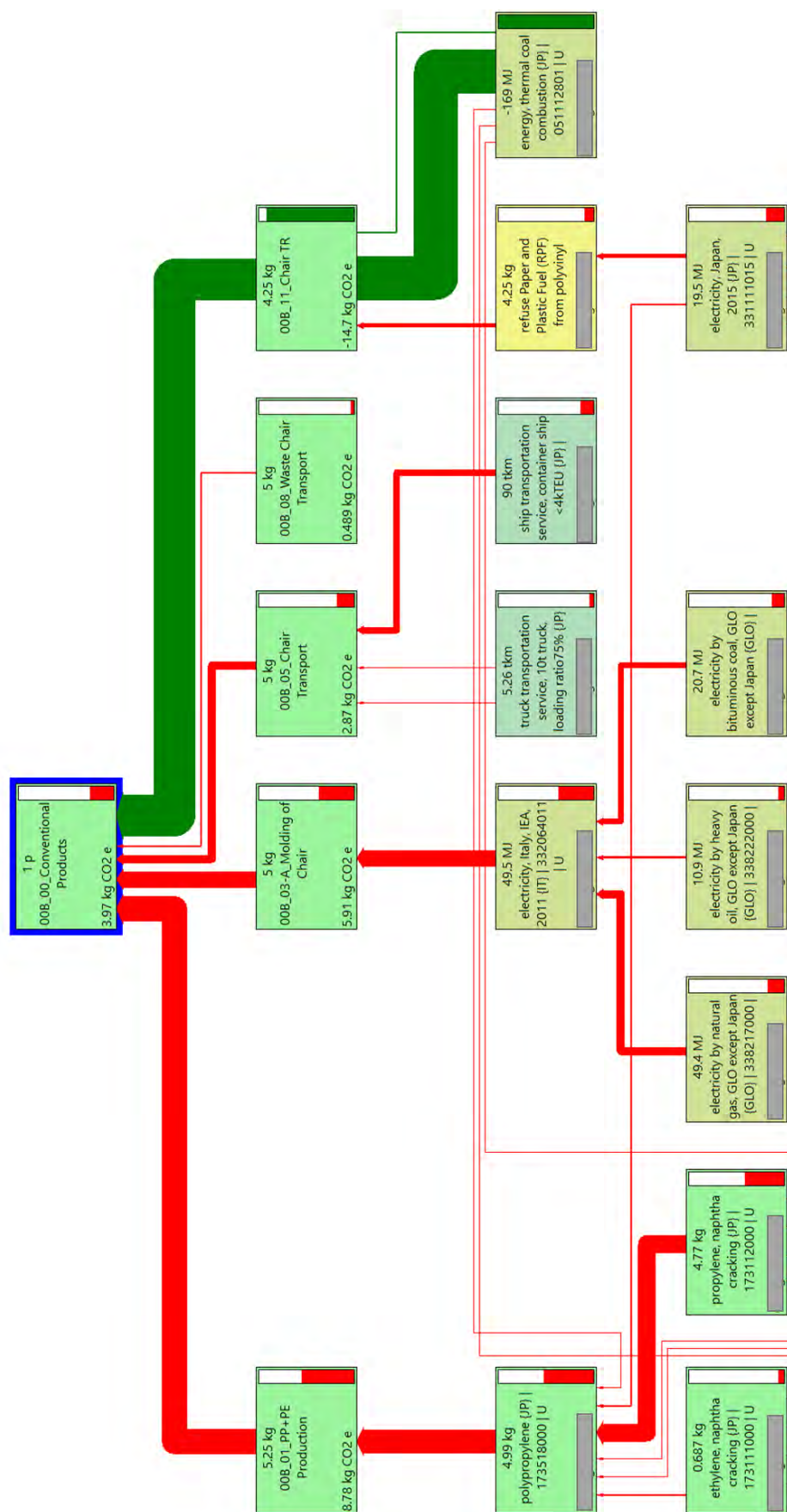


図 3-13 従来型のエネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 3%)

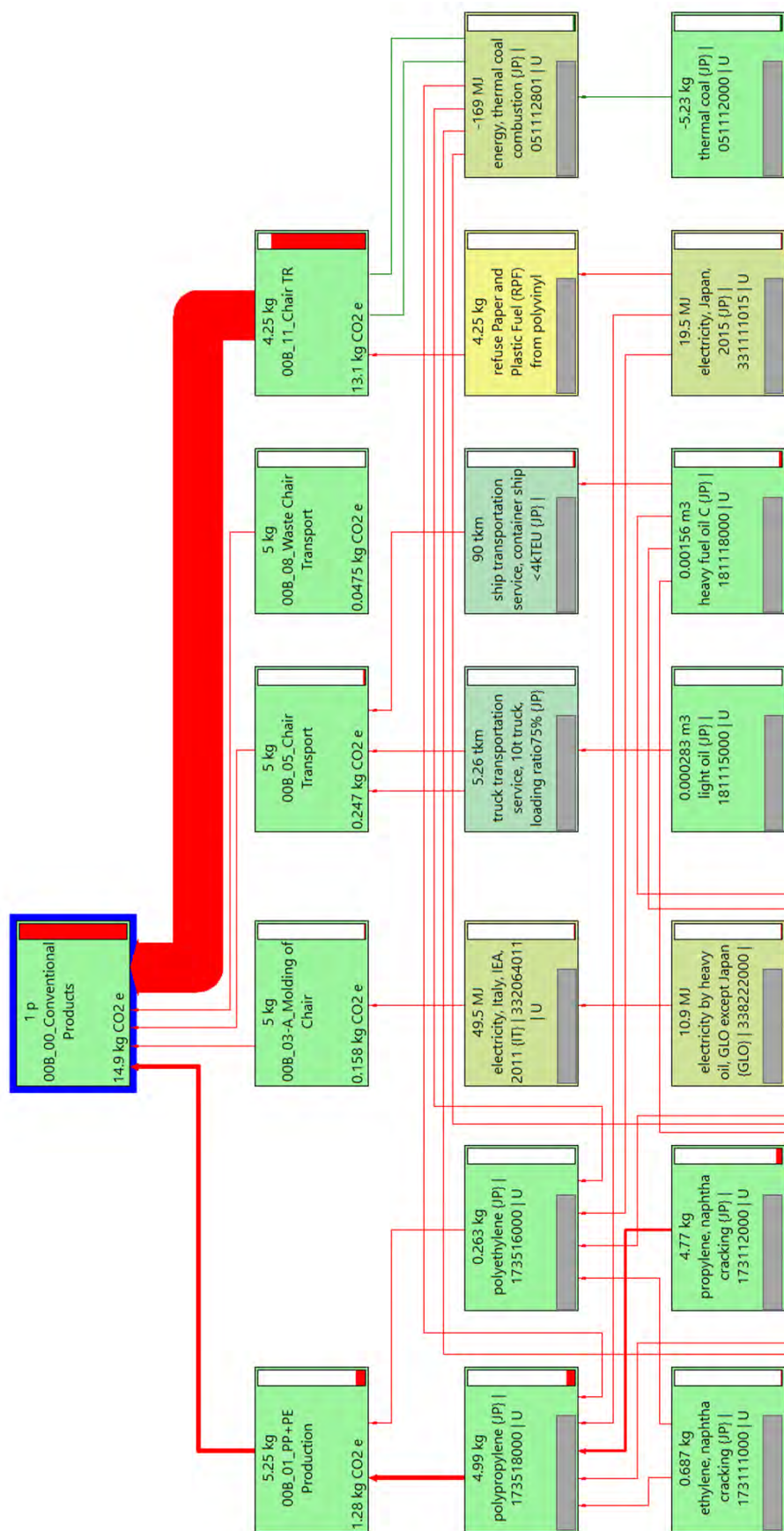


図 3-14 従来型の非エネルギー起源の LCA 結果 ネットワーク図 (カットオフ: 0.3%)

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 の製造 (PE_production) 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。また、バイオ PE の原料であるエタノールの生産時に共製品として出力される電力 (Ethanol_Production_Electricity_Cogeneration) はバイオ PE の製造時のエネ起の排出量を抑制する効果があることが見てとれる。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) の影響が大きい。

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 1: フィラーの変更

次にフィラーを変更した感度分析結果を示す。事業開始当初に基準とした CNF よりもその他のフィラーを用いた結果の方が合計 GHG 排出量は小さくなり、エネルギー起源についても従来型と比較しても削減される結果となった。

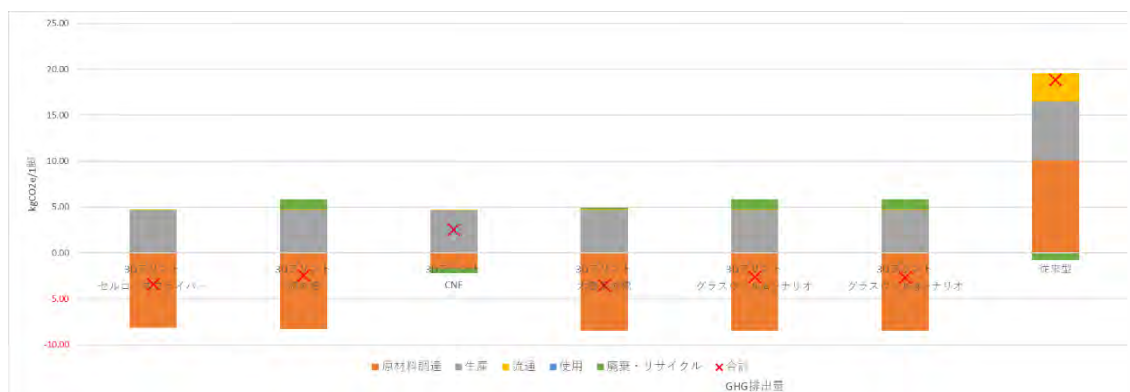


図 3-15 3D プリントのフィラー別と従来型の LCA 結果

表 3-22 3D プリントのフィラー別と従来型の LCA 結果 詳細

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 セルロースファイバー	-3.40	-8.18	4.65	0.07	0.00	0.06
3D プリント 卵の殻	-2.49	-8.30	4.65	0.07	0.00	1.09
3D プリント CNF	2.53	-1.69	4.65	0.07	0.00	-0.50
3D プリント 木質系の綿	-3.51	-8.47	4.65	0.07	0.00	0.24
3D プリント グラスウール A シナリオ	-2.66	-8.47	4.65	0.07	0.00	1.09
3D プリント グラスウール B シナリオ	-2.67	-8.48	4.65	0.07	0.00	1.09
従来型	18.82	10.09	6.39	3.12	0.00	-0.79

kgCO2e/1
脚

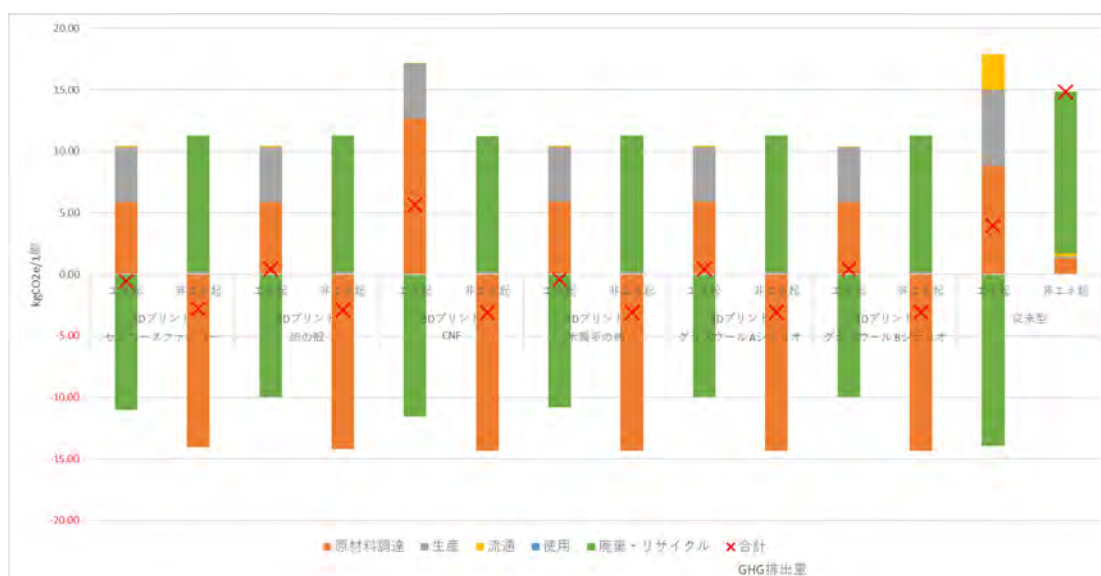


図 3-16 3D プリントのフィラー別と従来型のエネルギー起源、非エネルギー起源の LCA 結果

表 3-23 3D プリントのフィラー別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 セルローズファイバ ー	エネ起	-0.59	5.89	4.46	0.06	0.00	-11.00
	非エネ起	-2.81	-14.07	0.19	0.01	0.00	11.06
3D プリント 卵の殻	エネ起	0.42	5.89	4.46	0.06	0.00	-9.99
	非エネ起	-2.91	-14.19	0.19	0.01	0.00	11.08
3D プリント CNF	エネ起	5.64	12.67	4.46	0.06	0.00	-11.55
	非エネ起	-3.12	-14.36	0.19	0.01	0.00	11.05
3D プリント 木質系の綿	エネ起	-0.41	5.89	4.46	0.06	0.00	-10.83
	非エネ起	-3.10	-14.36	0.19	0.01	0.00	11.06
3D プリント グラスウール A シ ナリオ	エネ起	0.43	5.89	4.46	0.06	0.00	-9.99
	非エネ起	-3.09	-14.36	0.19	0.01	0.00	11.08
3D プリント グラスウール B シ ナリオ	エネ起	0.42	5.88	4.46	0.06	0.00	-9.99
	非エネ起	-3.09	-14.36	0.19	0.01	0.00	11.08
従来型	エネ起	3.97	8.81	6.21	2.87	0.00	-13.92
	非エネ起	14.85	1.28	0.19	0.25	0.00	13.14

kgCO2e/1 脚

ファイラーの変更による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 3-17 3D プリントのファイラー別の LCA 結果

表 3-24 3D プリントのファイラー別の結果の内訳

ファイラー	ガラスウールの設定シナリオ	合計 GHG 排出量	バイオ PE の製造	バイオ PE 分の TR				ファイラーの製造	ファイラー分の TR			MR			それ以外
				PE_石炭代替	PE_破砕	PE_RPF 化	PE 燃焼による直接排出		石炭代替	破砕	RPF 化	原材料代替	破砕	ペレット化	
セルロースファイバー		-3.40	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	0.34	-1.03	0.01	0.33	1.90	0.01	0.28	7.82
①卵の殻		-2.49	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	0.20	0.00	0.01	0.33	1.92	0.01	0.28	7.82
②CNF		2.53	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	7.98	-1.59	0.01	0.33	0.75	0.01	0.28	7.82
③木質系の綿		-3.51	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	0.01	-0.85	0.01	0.33	1.95	0.01	0.28	7.82
④グラスウール	A シナリオ	-2.66	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	0.01	0.00	0.01	0.33	1.95	0.01	0.28	7.82
	B シナリオ	-2.67	-12.98	-12.65	0.04	1.32	11.21	-0.01	0.00	0.01	0.33	1.95	0.01	0.28	7.82
kgCO2e/1 脚															

ファイラーを変更することによって「ファイラーの製造」、「石炭代替」、「原材料代替」の 3 つ (表中で黄色のパターンでハイライト) が変化した。CNF の製造に伴う排出量が他のファイラーと比較しても突出して大きいことから CNF をファイラーとして用いた場合のみライフサイクルでプラスとなった。MR による原材料代替がプラスの値となっており、MR を推進すればするほど GHG 排出量が増える結果となっているが、これは 3D プリントの原材料調達段階 (バイオ PE 及びファイラーの製造、輸送) の GHG 排出量の負荷が正味でマイナスだからである。なお、ファイラーを CNF とした時の増加分の代替効果が最も小さいが、これは CNF の単位重量あたりの製造に伴う GHG 排出量が大きく原材料調達段階におけるマイナス幅が少ないためである。

3-5-3. 感度分析 2: 金型の使用回数変更

従来型の成形では同一の製品を連続して製造するために金属性の金型が用いられる。この金型の重量を2,700kgと推計した。この金型によって製造される椅子の数が多いほど1脚あたり金型の負荷は小さくなる。[株式会社 SG 総研 2019]によれば、射出成形のショット数は最低でも1万回、平均して2万回～10万回が利用されるとのことから今回その幅の平均の45,000回を採用した。本感度分析ではこのショット数を最低から最大まで変化をさせた時の結果を示す。



図 3-18 金型の使用回数別の結果

表 3-25 金型の使用回数別の結果 段階別

成形方法	金型使用回数	合計	成形	機械製造	金型材料	それ以外
回転	10,000	19.31	6.09	0.17	0.62	12.43
	20,000	18.99	6.09	0.17	0.31	12.43
	45,000	18.82	6.09	0.17	0.14	12.43
	100,000	18.75	6.09	0.17	0.06	12.43
3Dプリント	0	-3.40	3.71	0.92	0.00	-8.03

kgCO2e/1 脚

本算定結果から、合計 GHG 排出量に対して金型の負荷は最大で 3%程度と多くを占めておらず、金型の使用回数が増えることで椅子 1 個あたりの金型の負荷は低くなる。一方で、金型は使

い続けるにあたって補修メンテナンスが行われているが、本算定にはその補修メンテナンス分の負荷は含まれていない。また、金型の加工負荷についても計上されていないことに留意する必要がある。

3-5-4. 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。以下に段階別の内訳を示す。

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	2	(5)	(3)
	生産	2	0	2
	流通	0	0	0
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(4)	4	0
	合計	(0)	(1)	(1)
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	3	0	4
	生産	2	0	2
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(5)	5	(0)
	合計	1	5	7
③ 削減量 (② - ①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
		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	1	6	7
	生産	1	(0)	1
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(1)	1	(0)
	合計	2	6	8

図 3-19 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	215	(514)	(299)
	生産	163	7	170
	流通	2	0	3
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(402)	404	2
	合計	(21)	(103)	(124)
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	322	47	368
	生産	227	7	233
	流通	105	9	114
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(508)	480	(29)
	合計	145	542	687
③ 削減量 (② - ①)		エネルギー 起源	非エネルギー 起源	合計
		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	107	560	667
	生産	64	(0)	64
	流通	102	9	111
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	(107)	76	(31)
	合計	166	645	811

図 3-20 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の材料の製造負荷については含まれているが、金型の加工負荷は含まれていない。一般に、金型は加工も多量のエネルギーを投入して製造されていると推測されるので、今後金型の加工負荷の実態については精査し、算定の精度を高めていく必要がある。
- 3D プリンタ型及び従来型について、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。

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.
- Moon Dami, Sagisaka Masayuki, Tahara Kiyotaka, Tsukahara Kenichiro. Progress towards Sustainable Production: Environmental, Economic, and Social Assessments of the Cellulose Nanofiber Production Process. Sustainability, 2017.
- STÅLBERG GÅRNLISA. Comparative LCA of street sandboxes made of polyethylene and glass fibre reinforced plastic. CHALMERS University of Technology, 2017
- 株式会社 SG 総研. 指定企業における屋外型家具生産実態調査. 調査報告書, 株式会社 SG 総研, 2019.
- 株式会社 EPM. 開発ストーリー | たまごの殻を原材料に使用したバイオマスプラスチックの開発ストーリー. <http://tamagonokara.co.jp/story/index.html>
- 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
- 栗原正夫, 山岸裕, 曽根直幸. 第 3 章 エネルギー利用手法. 著: 都市由来植物廃材のエネルギー利用手法等に関する技術資料 (pp143-218). つくば市: 国土交通省 国土技術政策総合研究所 緑化生態研究室, 2015.
- 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.
- 全国木材チップ工業連合. "第 2 章 木材チップの含水率." 著: H23 年度木材チップ等原料転換型報告書, 脚本: 全国木材チップ工業連合, 2011.
- 相部. Tatami の消費電力測定結果. 慶應義塾大学, 2019.
- 東京農業大学 農山村支援センター. "第 2 章 木質バイオマスエネルギー編." 著: 再生可能エネルギーを活用した地域活性化の手引き, 脚本: 農山村支援センター東京農業大学, 12-23. 2015.

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 3-26 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	
	卵の殻	Scenario1 Egg shell	
	セルロースファイバー	Scenario2 Cellulose fiber	
	木質系の綿	Scenario3 Wood-based cotton	IDEA の boards less than 7.5cm depth of minimum cross section, with more than 4 times width larger than depth {JP} 13111000 U に接続している。
	グラスウール	Scenario4 Glasswool	グラスウールの発生源によって利用する接続先が変化する。

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す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 {JP} 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 3- 21 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- 27 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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U		
C4 distillate, naphtha cracking {JP} 173119000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 17	
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		
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}		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
electricity by anthracite, GLO except Japan {GLO} 338212000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 33	
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		
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
contracted omnibus transportation service {JP} 431112000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 43	
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
coastwise vessel transportation service, cargo {JP} 452211000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 45	
coastwise vessel transportation service, cargo, tanker {JP} 452212000 U		
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		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
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		
air transportation service, cargo, domestic {JP} 462111000 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 46	
air transportation service, cargo, international {JP} 462112000 U		
air transportation service, passenger, domestic {JP} 461111000 U		
air transportation service, passenger, international {JP} 461112000 U		
energy, Refuse Derived Fuel (RDF) combustion {JP} 519100803 U	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 51	
energy, waste plastics combustion {JP} 519100802 U		
energy, waste tires combustion {JP} 519100801 U		
01_planting and logging	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
01_Sugarcane Growing_Agricultural Operations		
02_chipping		

プロセス名	変更した基本フロー	備考
03_transportation		た。
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)		

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、バイオプラスチ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	Distrib
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 3-22 SimaPro 上の接続例

表 3-28 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	●	

プロセス名	接続した基本フロー	エネ起	非エネ起
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(Baskem NewsRelease)	1	kg	Mass	100 %	not defined	00_KeioU_1/BioPE			
Add									
Inputs									
Inputs from nature	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	SI	
Add									
Inputs from technosphere: materials/fuels		Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment	
01 Sugarcane Growing Agricultural Operations		0,91	kg	Undefined					
02 Sugarcane Growing Land Use Change Credits		-1,1	kg	Undefined					
03 Sugarcane Growing CO ₂ 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		Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment	
Add									

図 3-23 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 3-29 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 CO ₂ (IPCC 2013)	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 05	1	kg CO ₂ e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 17	1	kg CO ₂ e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 18	1	kg CO ₂ e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 33	1	kg CO ₂ e / kg
	Emissions, carbon dioxide (fossil), air, unspecified, 34	1	kg CO ₂ e / kg

カテゴリ名	基本フロー	特性化係数	単位
	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_非エネルギー 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
	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 3-30 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		
00B_01_PP+PE の製造	kg		polypropylene {JP} 173518000 U	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。
			polyethylene {JP} 173516000 U	
			BioPE(Braskem NewsRelease)	
00B_02_PP+PE の輸送	tkm	00B_02_PP+PE Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio 75% {JP} 44111402 U	それぞれ海外陸上、国際海運、国内陸送用である。
			ship transportation service, container ship <4kTEU {JP} 451200107 U	
			truck transportation service, 10t truck, loading	

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
			ratio75% {JP} 441111402 U	
00B_03-A_椅子の成形加工	kWh	00B_03-A_Molding of Chair	electricity, Japan, 2015 {JP} 331111015 U	ヒアリングより 国内生産
00B_03-B_成形加工機械	p	00B_03-B_Machine use	iron castings for machinery {JP} 235111000 U	
00B_03-C_金形	p	00B_03-C_Mold use	special steel, final, 4 digit {JP} 233100000 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	
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 ratio75% {JP} 441111202 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_Chair MR Sub	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	

ベアスライン (従来製品製法)	単位	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
			intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
00B_11_椅子のサーマルリサイクル	kg	00B_11_Chair TR	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	Outputs to technosphere: Avoid products
			refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) from polyvinyl chloride (PVC) contained within plastics {JP} 519100204 U	
			intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
			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 3-31 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		
00A_01_PE の製造	00A_01_PE Production	BioPE(Braskem NewsRelease)	
00A_02_添加剤の製造	00A_02_Additives Production	Cellulose Nanofibers(CNF)	
		Scenario1 Egg shell	
		Scenario2 Cellulose fiber	
		Scenario3 Wood-based cotton	
		Scenario4 Glasswool	
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	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
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 {JP} 511100214 U	
00A_07_椅子の輸送	00A_07_Chair Transport	truck transportation service, 10t truck, loading ratio 75% {JP} 441111402 U	
00A_08_加工ロスの輸送	00A_08_Transportation of processing loss	truck transportation service, 2t truck, loading ratio 75% {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 ratio 75% {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 ratio 75% {JP} 441111202 U	

評価対象製品 (3d プリント)	SimaPro 上の名称	IDEA 接続先	備考
00A_11-3_焼却灰の埋立	00A_11-3_Incineration ash landfill	landfill treatment service, industrial wastes {JP} 852211000 U	
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_03_PE Transport	Outputs to technosphere: Avoid products
		00A_02_Additives Production	Outputs to technosphere: Avoid products
		00A_04_Additives Transport	Outputs to technosphere: Avoid products
00A_13_椅子のサーマルリサイクル	00A_12-03_Chair MR Horizontal_Pellet production	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	
	00A_12-02_Chair MR Horizontal_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
	00A_12_Chair MR Sub	reclaimed plastic pellet {JP} 195112111 U	
		intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 U	
00A_13_椅子のサーマルリサイクル	00A_13-1-01_Chair TR_Coal substitute	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	Outputs to technosphere: Avoid products
	00A_13-1-03_Chair TR_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_13-1-02_Chair TR_Crushing	intermediate treatment service of used refrigerator (crush) {JP} 512100206 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_Coal substitute	energy, thermal coal combustion {JP} 051112801 U	Outputs to technosphere: Avoid products
	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	
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		サポコパ-トメント 量			単位 分布		
(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		サポコパ-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- 24 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。

製品						
テラ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_00_Conventional Products	1	p	Amount	100 %		...\00B_E
(ここに挿入)						
テラ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 2		
(ここに挿入)						
インプット						
自然（資源）からの入力		サブコンポーネント 量		単位	分布	
(ここに挿入)						
テラスフィア（材料/燃料）からの入力	量	単位	分布			
00B_01_PP+PE Production	$BF_PEWeight*(1+BF_LossWeightPer) = 5.25$	kg				
00B_02_PP+PE Transport	$BF_PEWeight*(1+BF_LossWeightPer) = 5.25$	kg				
00B_03-A_Molding of Chair	$BF_Weight = 5$	kg				
00B_03-B_Machine use	1	p	未定義			
00B_03-C_Mold use	1	p	未定義			
00B_04_Processing Loss	$BF_Weight*BF_LossWeightPer = 0.25$	kg				
00B_05_Chair Transport	$BF_Weight = 5$	kg				
00B_06_Transportation of processing loss	$BF_Weight*BF_LossWeightPer = 0.25$	kg				
00B_07_Use of the chair	0	p	未定義			
00B_08_Waste Chair Transport	$BF_Weight = 5$	kg				
00B_09_Incineration of Chair	$BF_Weight*BF_InPer+min_PER = 1E-8$	kg				
00B_10_Chair MR Sub	$BF_Weight*BF_RPer*BF_MRPer+min_PER = 0.75$	kg				
00B_11_Chair TR	$BF_Weight*BF_RPer*BF_TRPer*BF_TR_include_yn+n$	kg				
00B_12_Landfill of Chair	$BF_Weight*BF_LPer+min_PER = 1E-8$	kg				
00B_13_mold waste	1	p	未定義			
(ここに挿入)						

図 3- 25 従来型の実装結果

製品							
テクノステ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	コメント
00A_00_3D Print Products	1	p	Amount	100 %		...\00A_After_Prod	
(ここに挿入)							
テクノステ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 2	最小	最大	
(ここに挿入)							
インプット							
自然（資源）からの入力	量	単位	分布	SD^2 又は			
(ここに挿入)							
テクノスティア（材料/燃料）からの入力	量	単位					
00A_01_PE Production	$AF_PEWeight*(1+AF_LossWeightPer) = 4.2$	kg					
00A_02_Additives Production	$AF_Additive*(1+AF_LossWeightPer) = 1.05$	kg					
00A_03_PE Transport	$AF_PEWeight*(1+AF_LossWeightPer) = 4.2$	kg					
00A_04_Additives Transport	$AF_Additive*(1+AF_LossWeightPer) = 1.05$	kg					
00A_05-A_3D Print of Chair	$AF_Weight = 5$	kg					
00A_05-B_3D Printer	1	p					
00A_06_Processing Loss	$AF_Weight*AF_LossWeightPer = 0.25$	kg					
00A_07_Chair Transport	$AF_Weight = 5$	kg					
00A_08_Transportation of processing loss	$AF_Weight*AF_LossWeightPer = 0.25$	kg					
00A_09_Use of the chair	0	p					
00A_10_Waste Chair Transport	$AF_Weight = 5$	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	$AF_Weight*(1+AF_LossWeightPer)*AF_RPer*AF_MRPer*AF_MRPer_H+min_PER = 0.788$	kg					
00A_12_Chair MR Sub	$AF_Weight*(1+AF_LossWeightPer)*AF_RPer*AF_MRPer*AF_MRPer_S+min_PER = 1E-8$	kg					
00A_13-1_Chair TR	$AF_PEWeight*(1+AF_LossWeightPer)*AF_RPer*AF_TRPer+min_PER = 3.57$	kg					
00A_13-2_Chair TR_Landfill	$AF_Additive_TR_ashRatio*AF_Additive*(1+AF_LossWeightPer)*AF_RPer*AF_TRPer+min_PER = 0.0179$	kg					
00A_13-3_Chair TR Additive only	$AF_Additive*(1+AF_LossWeightPer)*AF_RPer*AF_TRPer+min_PER = 0.893$	kg					
00A_14_Landfill of Chair	$AF_Weight*(1+AF_LossWeightPer)*AF_LPer+min_PER = 1E-8$	kg					
(ここに挿入)							

図 3- 26 3D プリンタの実装結果

4. 3D プリントによる個別化屋外型家具に関する市場調査

4-1. 3D プリントによる個別化屋外型家具に関する市場調査の目的

LCA の検証・評価の基礎データとするために、家具業界におけるプラスチック製屋外型家具の生産・流通・廃棄プロセスおよび製造・輸入・流通・リサイクル量を調査により明らかにする。

4-2. 屋外型家具に関する市場調査

プラスチック製屋外型家具の製品種、市場規模、生産国、輸入販売経路、参入企業などの市場調査を行った。ポリエチレン (PE) が主材料となりうる家具のカテゴリーを図 4-1 に示す。主に野外用家具に利用、素材の組み合わせと製造方法によって 3 つのグループに分けられる。3D プリンタによる製造を前提として、一体成型品の市場規模と動向の調査とした。

● PEテープ + アルミ・スチールフレーム



● PE一体成型品



● PP一体成型品 + 複合パーツ



● PE、PP一体成型品の現状



図 4-1. ポリエチレン (PE) が主材料となりうる家具のカテゴリー、一体成型品の例

当該素材の屋外型家具市場は2018年実績で19億円8,000万円であり、成熟した市場であることから急速な変化はないものの堅調に推移している。

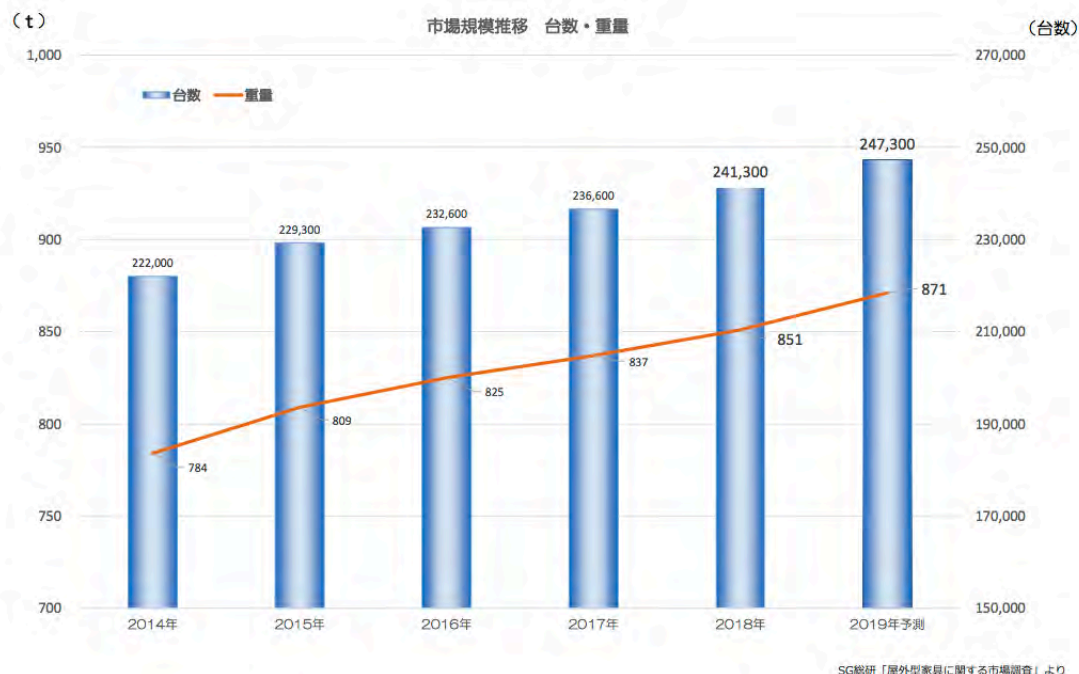


図 4-2. 屋外型家具市場規模 台数・重量

品目別規模としてはイス、テーブル、ベンチの順に大きく、イスの売上が2018年実績では12億円4,000万円と全体の約60%を占めている。ベンチに関しては近年メンテナンスを必要とせず、耐久性の高いとしている木に近い素材である樹脂木とスチールを組み合わせた製品が人気を集めている。



図 4-3. 屋外型家具市場規模推移 台数内訳



図 4-4. 屋外型家具市場規模 重量内訳



図 4-5. 屋外型家具市場規模 金額

品目別における素材別規模としては、素材のほとんどが耐熱性、耐久性の高いポリプロピレンが主流であり、他素材の製品は僅少である。

当該市場の国内外別においては 2018 年実績で輸入販売企業が 16 億 4,000 万円と全体の約 80% を占めており、輸入販売企業が主力企業となっている。輸入品に関してはイタリア製のものが多く、そのほかヨーロッパ製のものが輸入の中心となっている。理由としては、商業施設や公共施設において海外製品はブランド力があり、デザイン性の高さなどが評価されている。ただし、海外製品は発送までに時間がかかることや製品自体が終売になることも多いことが懸念材料である。

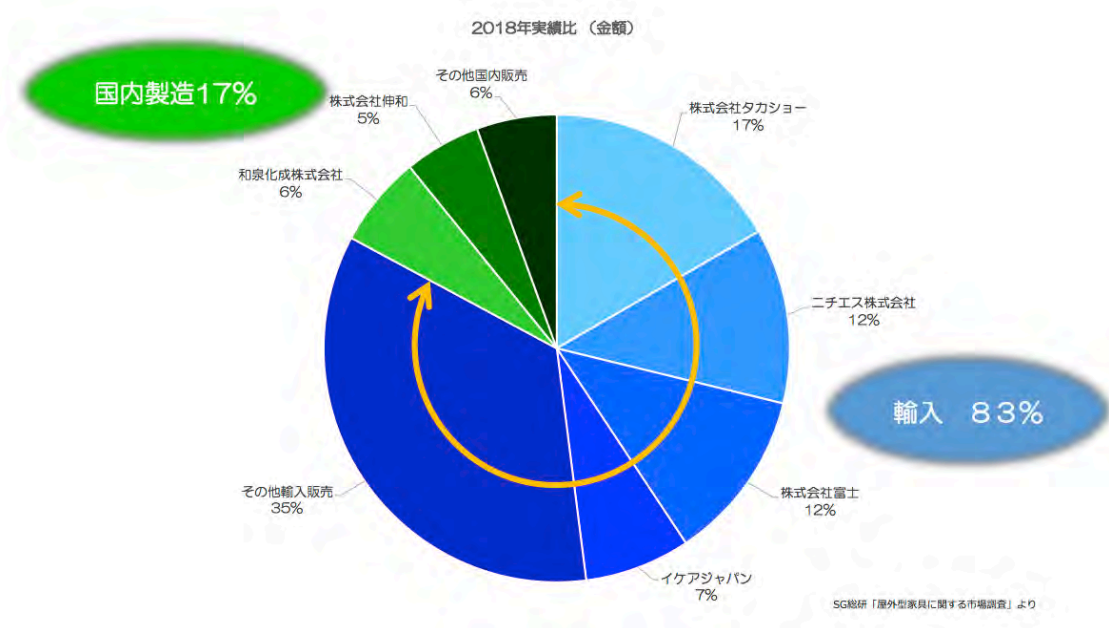


図 4-6. 屋外型家具市場シェア

当該市場のシェアは大手ホームセンターを顧客に持っているタカショーに続いて、商業施設や公共施設への販売に強みを持つニチエス、富士が上位企業に位置づけされる。販売傾向は大きく変化することはなく、市場は堅調に推移すると考えられる。

4-3. 指定企業における屋外型家具生産実態調査

国内で屋外型家具製造を行っている株式会社A(新潟県新潟市)および株式会社B(愛知県一宮市) 2 社について、製品種、生産量、成型方法、原料、製造エネルギー量、素材調達、梱包、加工ロスと処理廃棄・リサイクルなどの生産実態調査を行った。2 社が取り扱う屋外型家具製品はいずれも PP 素材で、射出成形機によって製造されている。プラスチック製の椅子やテーブルは他のプラスチック製品に比べてサイズと重量が大きいので、それらに用いられる射出成形機と金型も大型であり、椅子とテーブルを成形するための射出成形機の型締力は、おおよそ 1,000t～1,600t で、金型のショット数は、サイズや重量によって異なるが 2 万から 10 万回程度であることがわかった。2 社それぞれの成形方法の模式図を示す。

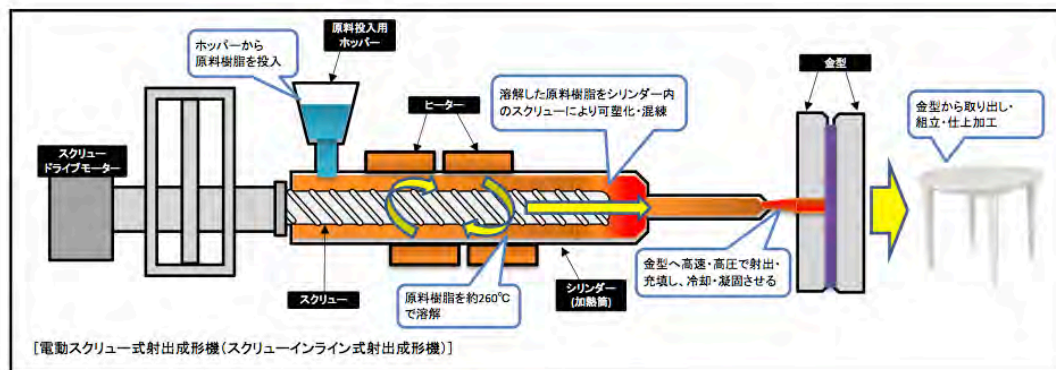


図 4-7. 屋外型家具成形方法(A)

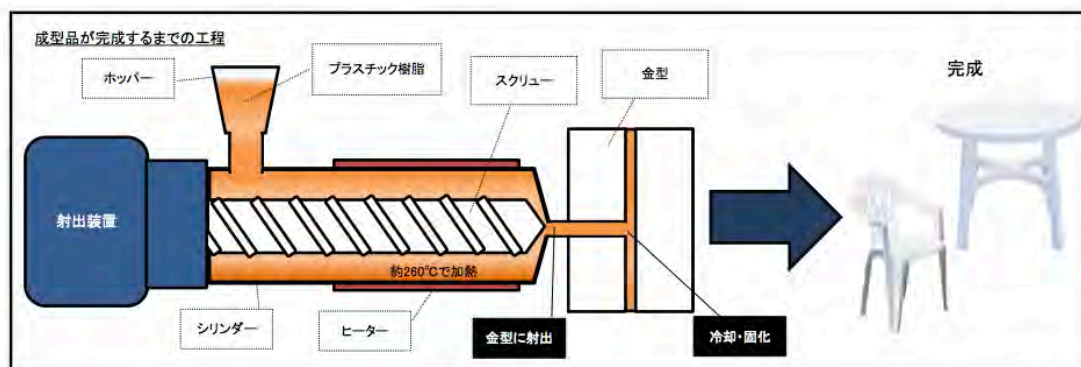


図 4-8. 屋外型家具成形方法(B)

製品を作る工程で破棄・不良品となってしまった同じ素材の成形不良品や廃プラスチックを上記の粉砕機で粉砕し、再度プラスチック材料として再生産する「材料リサイクル」を行っている。加工ロス率は4～5%程度である。2社それぞれの加工ロスと処理方法の模式図を示す。

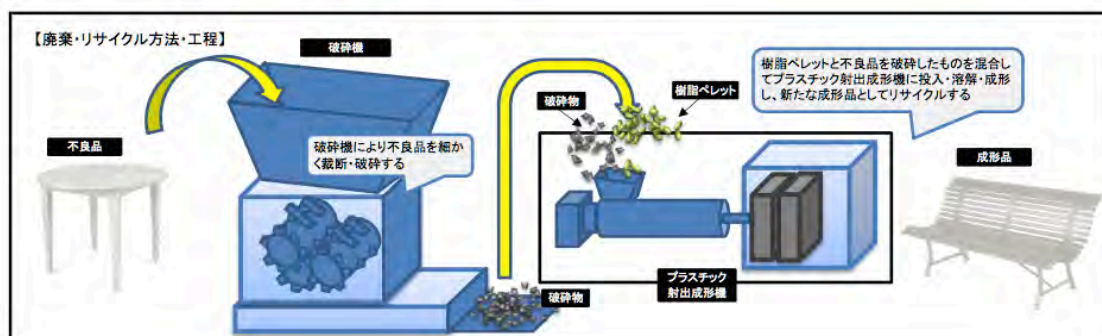


図 4-9. 加工ロスと処理方法(A)

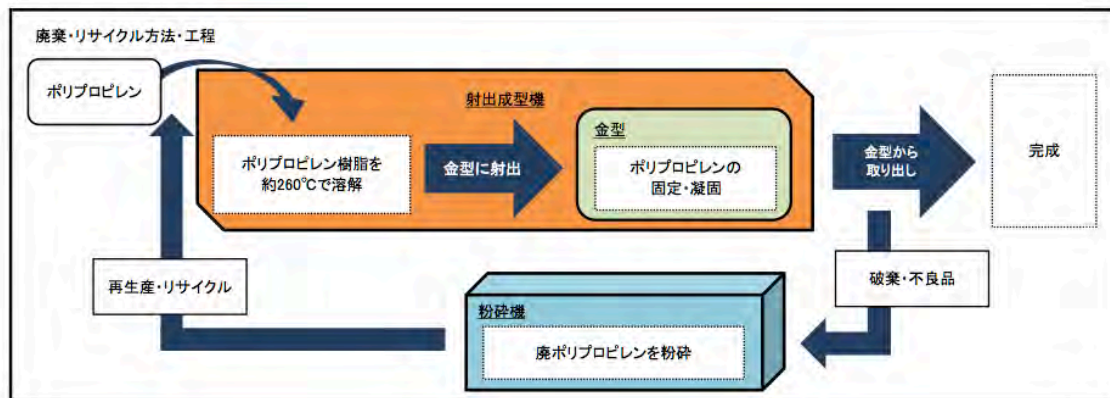


図 4-10. 加工ロスと処理方法(B)

4-4. 課題

PE 製屋外型家具海外製品の多くは回転成形機によるものとされており、これらの

- ・ 金型の重量、サイズ、価格
- ・ 金型を製造するにあたっての製造エネルギー量、金型の製造方法
- ・ 金型成形のエネルギー量、金型寿命(ショット数)、リサイクル方法

などの調査が課題である。

また従来型家具のリサイクル量については、株式会社オカムラ社の CSR レポート 2018 より、

プラスチックの材種としては PP、PA、ABS など リサイクル量 1,278 トン

その区分と比率は、同社内調査では

- A. 再生プラスチックとして生まれ変わるもの 14～15%
- B. RPF (マテリアル固形燃料)の原料に回されるもの 85～86%

と算定され、再生プラスチックが何に利用されるかは不明、ゴミのような廃プラでも RPF に回され、ほぼ 100%リサイクルされているとのことである。バイオ PE の 3D プリント家具のリサイクルについては、素材となるペレット再生・性能劣化の実験によりマテリアル・リサイクルの検証を行うとともに、脱炭素化に向けてどのような製品ビジネスモデルとライフサイクルが適するかを検討を行い、3D プリント家具で代替される従来型椅子製品体像を明確にして、生産・リサイクル過程の詳細な調査を進めることが必要である。

