

2023年度 油脂産業論文

テーマ：油脂産業における脱炭素社会への貢献

油脂リサイクル素材 による脱炭素建築の実現

～油脂産業界が貢献する

未来のエコスタイルハウスの在り方～

花王株式会社

生物科学研究所 カサマツ シンヤ
笠松 慎也

生物科学研究所 スガタ ケイイチ
菅田 慶一

目次

はじめに	1
第1章 日本における社会問題	
1-1 少子・高齢化問題	2
1-2 空き家問題	4
1-3 建築業界における労働環境変化と原材料費の高騰	6
第2章 油脂産業における廃棄物問題	
2-1 廃油の課題	7
2-2 廃植物リサイクルの課題	9
第3章 油脂リサイクル素材を活用した3Dプリンターによる住宅建設	
3-1 3Dプリンターを活用した住宅建設によるメリット・デメリット	10
3-2 廃油からの3Dプリンター用樹脂への再生	13
3-3 廃植物からの3Dプリンター用CNFへの再生	15
3-4 廃食用油、廃植物・木材の回収方法	16
3-5 3Dプリンターと油脂リサイクル素材による脱炭素建築の実現	17
3-6 建築コスト	18
3-7 脱炭素3Dプリント住宅による住まい方の転換	20
おわりに	21
注釈	24
参考文献	25

はじめに

我が国は戦後急速な発展を遂げ、先進国の仲間入りをした。しかしながら1990年代前半のバブル崩壊後より日本の経済成長は著しく鈍化した。これには少子・高齢化の影響も大きく関わっている。先進主要国における2022年の平均賃金(US\$)を見てみると、アメリカ：77463、カナダ：59050、ドイツ：58940、イギリス：53985、フランス：52764、イタリア：44893、日本：41509となっており、日本は最下位である¹⁾。2000年における平均賃金データ¹⁾を基準に上昇率を算出すると、アメリカ：34.7%、カナダ：32.4%、ドイツ：23.7%、イギリス：33.1%、フランス：30.0%、イタリア：10.6%、日本：6.9%となっており、他国と比較してもこの20年間で日本の賃金はほとんど上昇していないことが分かる。さらに近年ではコロナ禍の影響で日本経済は深刻な打撃を受けた。現在、コロナ禍からは回復しつつあるが、ロシアによるウクライナ侵攻により、国際商品市況の急騰や円安が進行し、輸入物価を通じたコストプッシュ型の物価上昇が生じている²⁾。その一方で、賃金の上昇は物価上昇には到底及ばず、生活者は苦しい局面を迎えている。

生活者の経済的な大きな負担の一つに住宅購入がある。一括支払いで住宅を購入可能な人はごくわずかであり、多くの場合は住宅ローンを組み、数十年に渡って支払いを続けることになる。さらに、住宅を購入することで、他の場所に移り住むことが困難になる可能性も生じてくるなど、費用以外のデメリットも存在する。

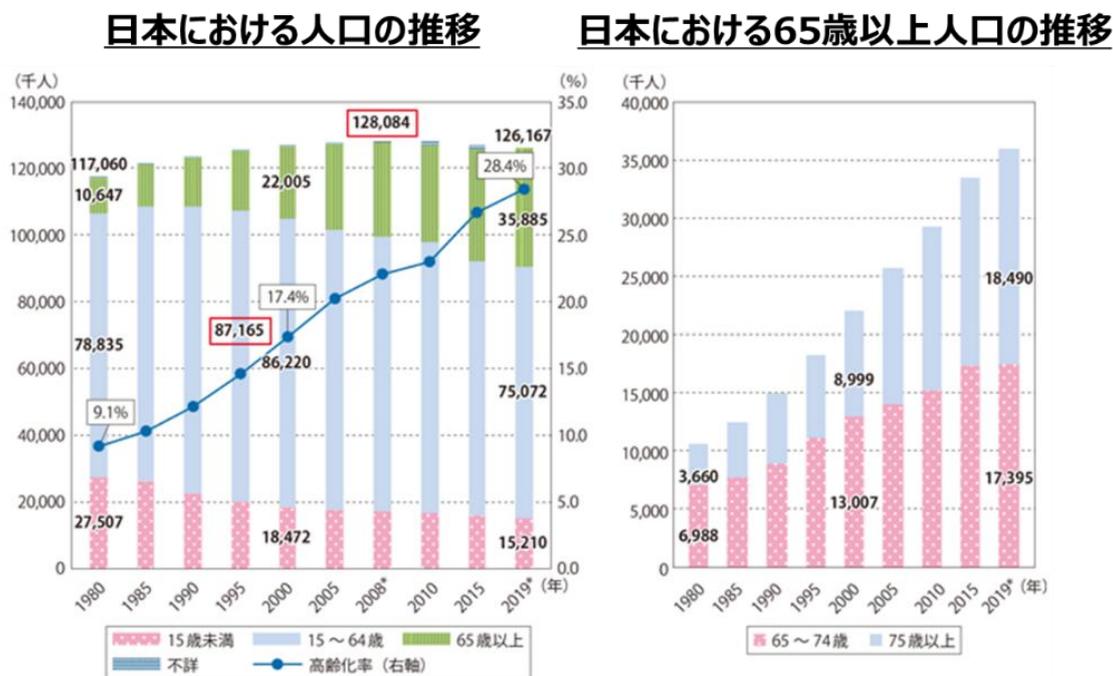
本論文では、住宅購入という生活者にとっての経済的負担並びに一旦購入すると移り住むことが困難になるというデメリットに対して油脂産業界が貢献できる可能性について考察した。具体的には、油脂産業から生じる廃棄物からのマテリアルリサイクルによって得た原料を使用し、3Dプリンターを用いて建築することで、今まで以上に安価に住宅を購入することが可能となり、増築・減築が容易であることから、その時々ライフステージに最適な未来のエコスタイルハウスの在り方を提案するというものである。さらには、この建築には廃棄物を利用することから、油脂産業界が脱炭素社会へ積極的に貢献できると共に、3Dプリンターを用いることで建築に必要な労働力の大幅な削減も可能となり、少子・高齢化による労働力低下問題に対

する有効なアプローチである。

第1章 日本における社会問題

1-1 少子・高齢化問題

日本は戦後から人口増加が続いていたが、少子化の影響もあり2008年の1億2,808万人をピークに減少に転じている。労働人口である15～64歳人口は1995年の8,716万人をピークに減少する一方で65歳以上人口は年々増加しており、2019年には全人口における65歳以上人口の割合(高齢化率)は実に28.4%にもなっている(図1)。さらに、先進主要国の中でも人口が減少しているのは日本のみであり、急速な高齢化は他国と比べて群を抜いている状況である(図2)³⁾。



資料) 総務省統計局「国勢調査」(2008年及び2019年は総務省統計局「人口推計」)より国土交通省作成

図1. 日本における人口減少と高齢化の加速

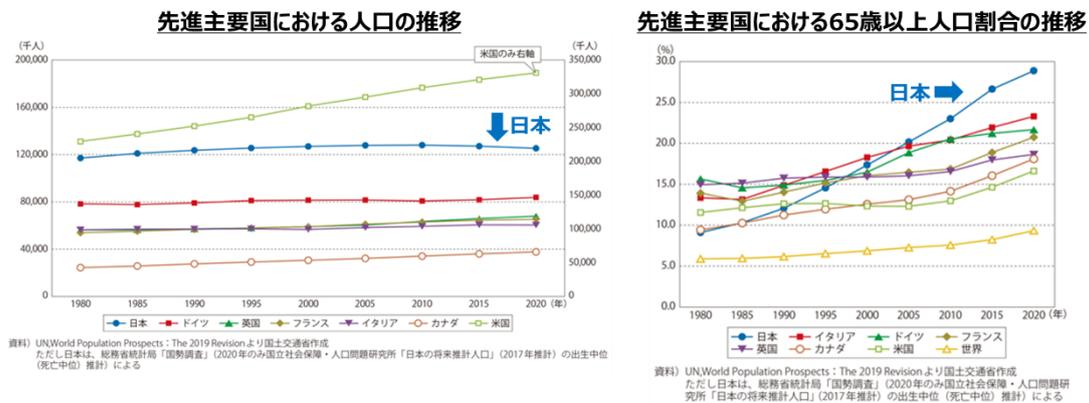


図 2. 先進主要国の人口推移と高齢化率

1-2 空き家問題

日本は戦後からの人口増加によって世帯数も増加の一途を辿っていたが、2008年からの人口減少とともに世帯数も2023年をピークに減少していくことが予測されている(図3)。住宅数、世帯数、空き家率の推移をみると、1968年以降は住宅総数が世帯総数を上回り余剰な住宅数が増加し続けている。2018年には空き家率は13.6%にもなっている(図4)⁴⁾。空き家が増加することで、防災性・防犯性の低下、ごみの不法投棄、衛生の悪化、悪臭の発生、風景・景観の悪化などの社会環境上の課題が発生し始めており(図5)⁵⁾、これらに対する早急な対策が求められている。

日本における人口・世帯数の推移

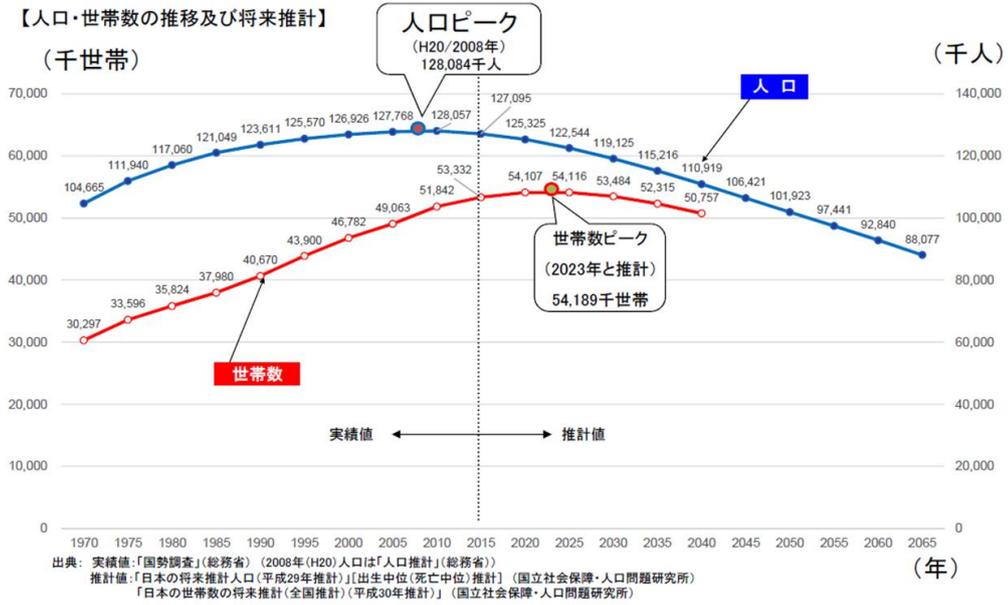
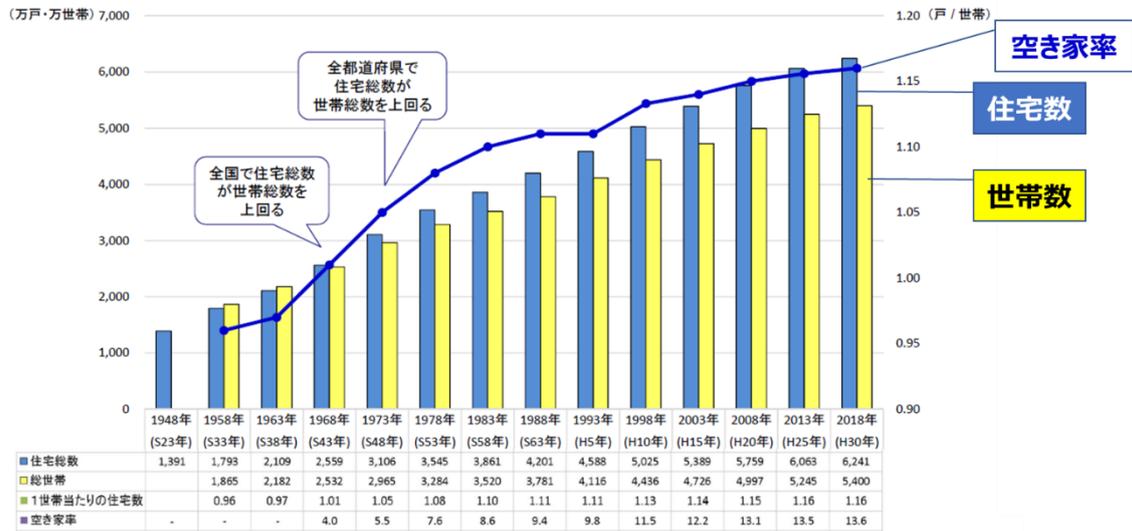


図 3. 人口減少と共に生じる世帯数の減少

日本における住宅数、世帯数、空き家率の推移



(注) 世帯数には、親の家に同居する子供世帯と住宅以外の建物に居住(2018年=約39万世帯)を含む。

出典：総務省「住宅・土地統計調査」

図 4. 空き家の増加

想定される問題の例

○防災性の低下

倒壊、崩壊、屋根・外壁の落下
火災発生のおそれ

○防犯性の低下

犯罪の誘発

○ごみの不法投棄

○衛生の悪化、悪臭の発生

蚊、蝇、ねずみ、野良猫の発生、集中

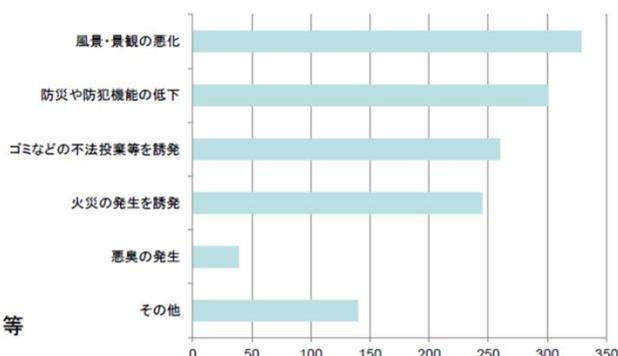
○風景、景観の悪化

○その他

樹枝の越境、雑草の繁茂、落ち葉の飛散 等



管理水準の低下した空き家や空き店舗の周辺への影響



※国土交通省による全国1,804全市区町村を対象とする アンケート(H21.1)結果。回答率は67%
※上記の件数は、複数回答によるもの

「空き家の現状と課題」国土交通省 より抜粋

図 5. 空き家の発生による問題点

1-3 建築業界における労働環境変化と原材料費の高騰

空き家問題が顕在化する中で、これまで住宅を作り続けてきた建築業界にも大きな変化が生まれてきている。従来、建築業界は他業態に比較して労働時間が長く人手不足が課題となっていた。近年の少子化問題や労働人口の減少により、その課題はより顕著になってきており、より人手を確保すべく給与水準を上げる手立てを打ってきている(図6)⁶⁾。さらには、2024年4月からの時間外労働の上限規制、いわゆる「2024年問題」が施行されることで、今後の建設業界の人手不足や給与水準のさらなる上昇が見込まれる。

また、ロシアによるウクライナ侵攻等による国際商品市況の急騰や円安の影響を受けて建設資材物価の高騰により、前述の労務単価の上昇と合わせることで、全建設コストは17~20%上昇したと試算されている(図7)⁷⁾。

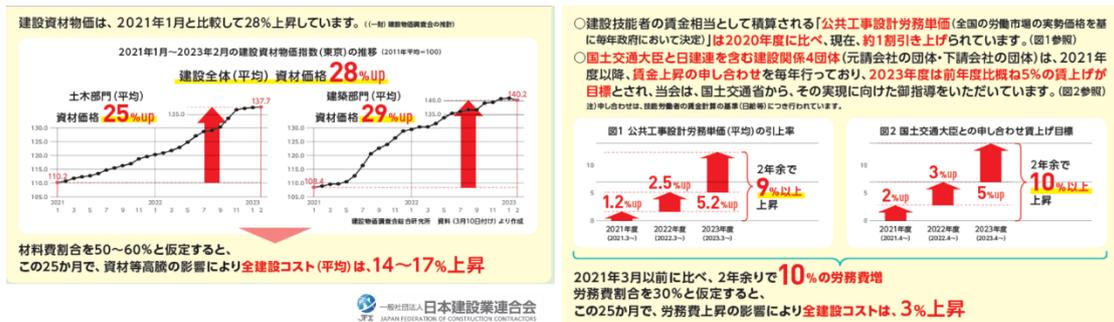
このように生活者にとっての夢の住宅購入は、ますます大きな負担になることが明確である。

建設業特有の長時間労働の常態化



ヒューマンタッチ株式会社ニュースリリース（2021年4月20日）より抜粋

図 6. この 10 年間の建設業界における労働環境変化



日本建設業連合会「建設資材高騰・労務費の上昇等の現状」パンフレット（2023年3月版）より抜粋

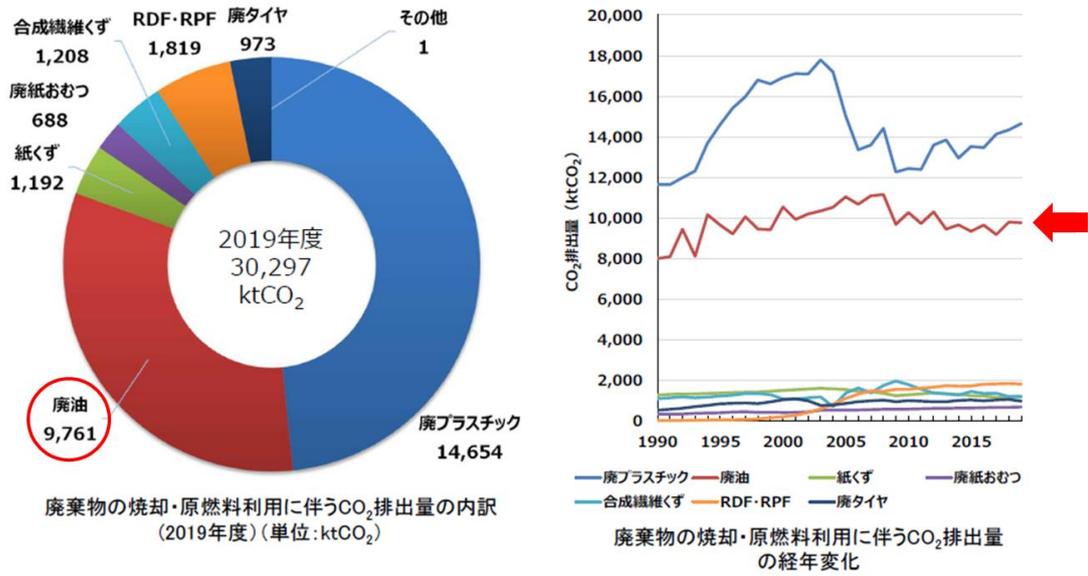
図 7. この 2 年間の建設業界における資材物価、労務費の高騰

第 2 章 油脂産業における廃棄物問題

2-1 廃油の課題

油脂産業では油脂を活用した事業を行っているが、不要となった廃油処理の過程で多くの CO₂ を大気中に排出している。廃棄物ごとの焼却・原燃料利用に伴う CO₂ 排出量の内訳を見ると、廃プラスチックに次いで廃油の割合が大きく、その排出量は年間で 9,761ktCO₂ で全体の 30%以上にもなる（図 8 左）。廃油処理による CO₂ 排出量はこの 30 年間でほぼ横ばいであるが、（図 8 右）⁸⁾、早急な削減対策が求められている。廃油には、外食産業や商店などの事業者から出るものと一般家庭から出るものがある。事業者から発生する年間 40 万トンの廃油のほとんどは飼料・工業・燃料原料へとリサイクルされて

いるが、家庭から出る年間 10 万トンの廃食用油のリサイクルは進んでいないのが現状である(図 9) ⁹⁾。



出典：(国研)国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス、日本の温室効果ガス排出量データ(1990～2019年度)確報値をもとに作成

廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)資料1
令和3年8月5日 環境省環境再生・資源循環局より抜粋

図 8. 廃油処理による CO₂ 排出量

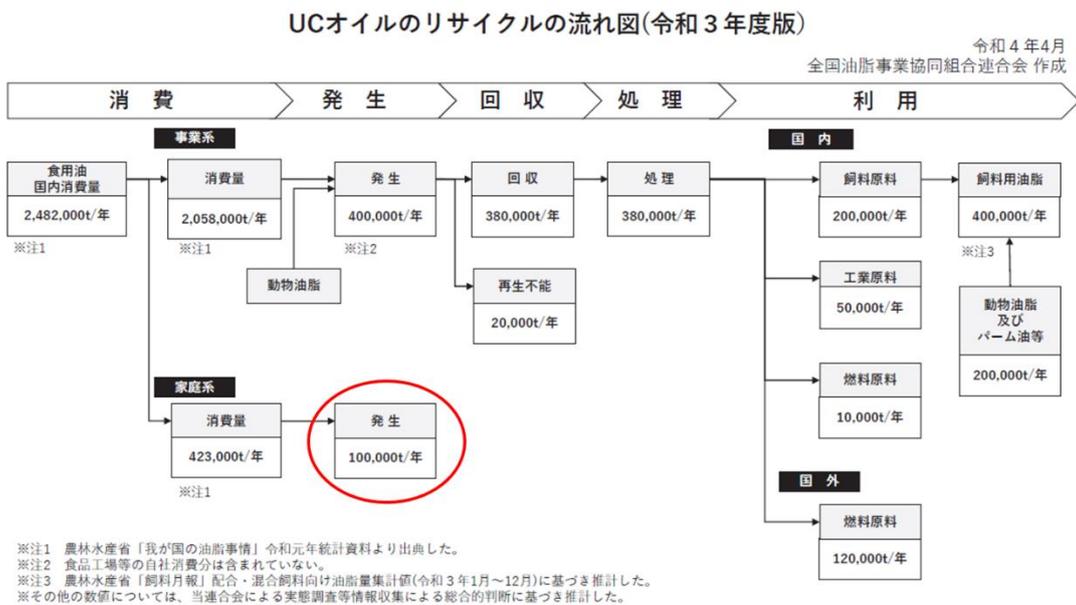


図 9. 廃食用油のリサイクルの状況

2-2 廃植物リサイクルの課題

2012年に導入された固定価格買取制度（Feed in Tariff (FIT)）により様々な再生可能エネルギーによる発電事業が推進された。そのうちバイオマス発電では、燃料として、パーム油を生産する過程で発生する副産物であるPKS^{*1}が着目され、日本への輸入量は急増している¹⁰⁾。また、山間部からの間伐材、製剤工場や建設現場から出る廃棄木材もバイオマス燃料としてサーマルリサイクル^{*2}されている（図10）¹¹⁾。このような廃植物のサーマルリサイクルは脱炭素社会実現のための重要な手段である。

ただし、「環境負荷の点からみると、バイオマス発電によるサーマルリサイクルへの傾斜はあまり望ましいとはいえない」¹²⁾との考えがある。一つの例として、木質チップを燃料としてサーマルリサイクルした場合に比較して、パーティクルボード^{*3}としてマテリアルリサイクルした場合の方が二酸化炭素排出量は少ないことが報告された（図11）。マテリアルリサイクルできる廃植物と、劣化が激しくサーマルリサイクルすべき廃植物を分別し、カスケード利用^{*4}すべきとの意見も存在する¹²⁾。



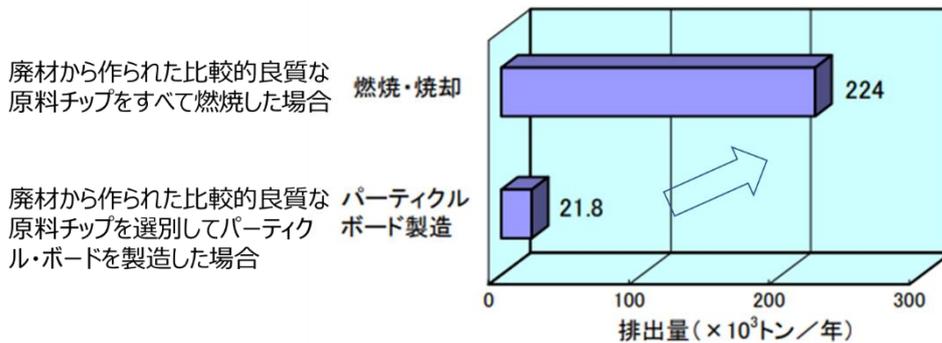
パーム椰子殻（PKS）輸入価格と輸入量の推移【最新】
| パームエナジーニュース (indonesia-palm.com)より



木質バイオマスとは | 一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会 (jwba.or.jp)より

図10. バイオマス燃料としてのPKSや木材の利用

(図表 9) 廃材の利用方法と CO₂ 排出量



2005年 みずほレポートより

図 11. 木質バイオマスのサーマルリサイクルの課題

第 3 章 油脂リサイクル素材を活用した住宅建設

3-1 3Dプリンターによる住宅建設のメリット・デメリット

第 1 章で述べた日本における社会課題及び第 2 章で述べた油脂産業における廃棄物問題を合わせて解決すると共に、油脂産業界が脱炭素社会へ積極的に貢献できる取り組みとして、油脂リサイクル素材を活用した住宅建設について本章で提案する。

建設業界における新たな取り組みとして、セメント系材料を用いた 3D プリンターによる建築物が考案され、国内で初めて建築基準法に基づく国土交通大臣の認定を取得した (図 12)。この方法は、材料使用量を抑えつつ自由度の高い斬新なデザインが可能であることと、3D プリンターのロボットアームが自動で構築するため 24 時間体制での製造が可能となり製造工程の短縮や¹³⁾、長時間労働、労働力不足といった建築業界の長きにわたる課題解決に期待が寄せられている。しかしながら、セメント系材料は製造時の CO₂ 排出量が多いことやリサイクルしにくいといったことから環境面での課題がある。

3D プリンターの原料には、熱硬化性あるいは熱可塑性樹脂系材料を使用することが一般的である。海外では、すでに廃棄プラスチック由来の再生プ

ラスチック樹脂を利用した環境配慮型の3Dプリンター住宅も販売されはじめている¹⁴⁾。また、研究段階ではあるが、植物由来樹脂原料を用いた3Dプリンター住宅例も報告されている(図13)¹⁵⁾。これは単一の植物系樹脂だけでは建材としての強度は不十分という課題に対して、植物系樹脂と木質繊維を複合することによって強度を補うというものである。植物系樹脂の強度補強という点では、植物由来の樹脂であるポリ乳酸と繊維(セルロースファイバー)を組み合わせた複合材料を原料として生分解性能を有する家電筐体の開発も進められている¹⁶⁾。このように植物由来樹脂の単体での強度は不十分ではあるが、樹脂と繊維を組み合わせることによって強度を補強でき、かつ、環境負荷の少ない素材開発が進んでいるのである。

こうした植物由来の樹脂と繊維の複合材料を3Dプリンター原料として住宅を建設することで、将来にわたって環境にやさしい住宅の建築が可能である。

本論文では、樹脂として廃油由来 PHBH 樹脂(3-2にて説明)を、繊維として廃棄植物を原料としたセルロースナノファイバー(以下 CNF: Cellulose Nano Fiber)の複合材料による3Dプリンター住宅、すなわち「エコスタイルハウス」とそれによる未来の街づくりを提案する(図14)。CNFとは、セルロースを主成分とする植物繊維を、ナノメートルサイズまでほぐして微細化した素材であり、環境にやさしい天然物ながら、鋼鉄の5分の1の軽さで5倍の強度を持つ、熱で膨張しにくい、吸水性が高いなどの特徴をもつものである。



3dpodの「pod」とは、和(かいこ)の「目(まゆ)」、豆の「まゆ」といった意味。壁や天井など建物の平面形状がピーナッツの「まゆ」のような形をしていることや、建物の外観が3Dプリンター建築ならではの有機的な形状の「目」のような形をしていることが名前の由来となっている

3Dプリンター実証棟「3dpod™」(2023年 4月25日 大林組)

- 材料使用量を抑えつつ、複雑なデザインや強度・耐久性を備えた構造物を設計可能
- ロボットアームが自動で行うので、24時間体制の製造が可能となり、製造工程が短縮
- × セメント使用(←石灰石)は脱炭素か？
建設工事、土木工事共に工事全体で排出される二酸化炭素量の約30%以上が、セメント、コンクリートの製造時に排出されている(次に鋼材が続く)
https://concrete-mc.jp/carbon_neutral-concrete
- × リサイクル性、環境

図 12. セメント系材料を用いた 3Dプリンター建築物のメリット、デメリット



廃棄物由来の再生プラスチック樹脂を用いた 3Dプリンター住宅

Azure Printed Homes ホームページより



トウモロコシ由来樹脂を木質繊維で強化した生分解性・バイオベース素材を用いた 3Dプリンター住宅

THE UNIVERSITY OF MAINE UMaine Newsより

図 13. 樹脂材料を用いた 3Dプリンター建築物の例

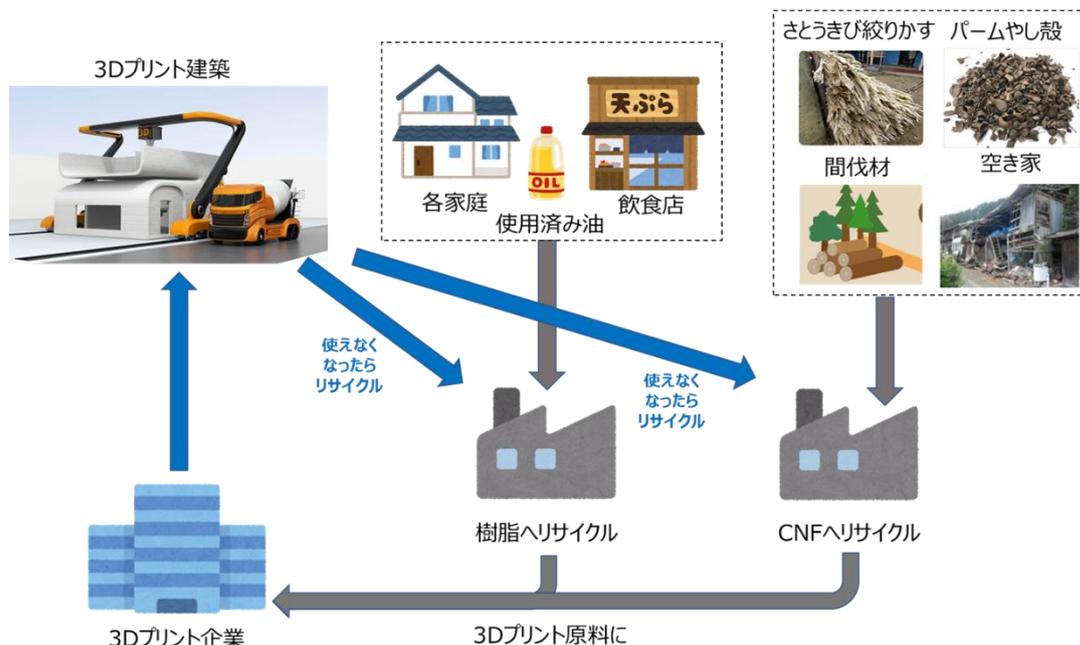


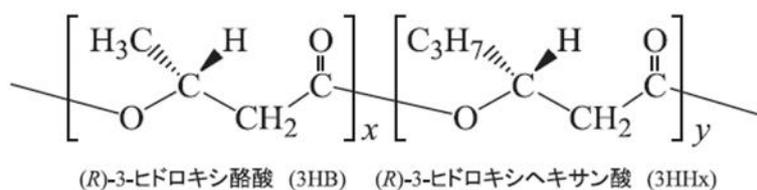
図 14. 3Dプリンターと油脂リサイクル素材による脱炭素建築の実現

3-2 廃油からの3Dプリンター用樹脂への再生

株式会社カネカにおいて、植物油であるパーム油からプラスチックの1種である PHBH (Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyhexanoate)) (図 15) を生産する土壌細菌が発見されている¹⁷⁾。その土壌細菌における PHBH の生産経路が明らかにされており(図 16)、遺伝子組換え技術^{※5}によって PHBH を大量に生産する株が作出されている¹⁸⁾。PHBH は生分解性が非常に高く、土壌や海水の中など自然環境下で二酸化炭素と水に分解され、環境に優しい素材である。既に使い捨て用の食器やストロー、バッグなどの製品原料として応用されている¹⁹⁾。

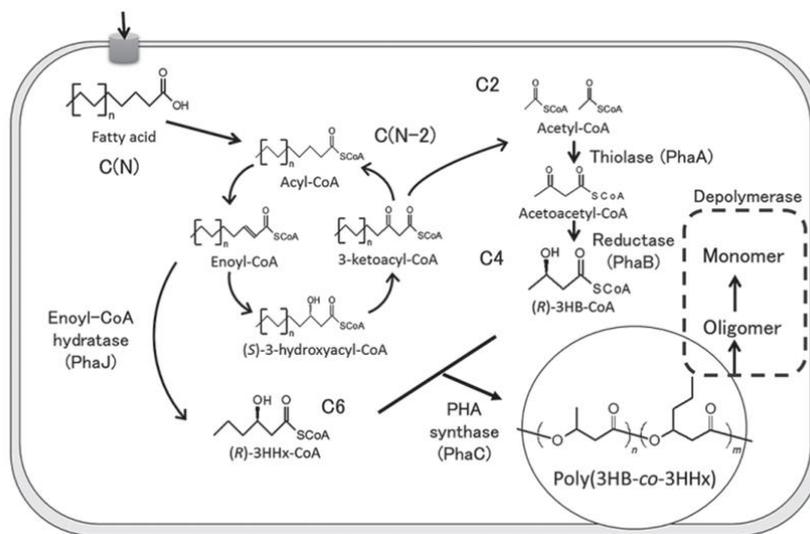
さらに、カネカを含む複数の機関において、家庭から回収した廃食用油を用いて PHBH を生産する手法について実証実験が実施されている。日本国内で発生する主な廃食用油の組成についての調査では、パーム油よりもヨウ素価^{※6}が高い大豆油や菜種油が多く含まれていることが判明した。そこで、パーム油と廃食用油とのハイブリッド培養や細菌の遺伝子組換え技術により高ヨウ素価油脂を効率的に資化させる株を作出することなどで、高ヨウ素価廃食用油を原料とした高い PHBH 生産技術が確立された。²⁰⁾

2-1で述べたように、現状では家庭から出る廃食用油はリサイクルが進んでいないため、この高ヨウ素価油脂を原料として PHBH を生産し、PHBH をすることで、3Dプリンター用樹脂とすることでエコスタイルハウスを建築することに着眼した。PHBH などのバイオプラスチックは強度や剛性に課題があるため、この強度や剛性を補うために、CNF を混合することを考えた。(図 17)²¹⁾。



松本圭司, 生物工学会誌, 第 94 巻第 5 号, (2016) p242-246 より抜粋

図 15. PHBH の構造



佐藤俊輔ら, 生物工学会誌, 第 97 巻第 2 号, (2019) p66-74 より抜粋

図 16. PHBH の生産経路



矢野浩之，セルロースナノファイバー補強によるバイオマスプラスチック用途拡大の推進より抜粋

図 17. バイオプラスチックの性能課題と CNF による補強

3-3 廃植物からの 3Dプリンター用 CNF への再生

CNF は植物細胞壁の基本物質であり、全ての植物資源が原料となり得る。CNF 原料として、他の目的で利用済みの廃棄植物を利用することが可能である。一例として、PKS から取り出した CNF と樹脂を組み合わせた複合材料に関する研究事例を図 18 に示した²²⁾。

CNF を用いた強化樹脂は、他のガラス繊維強化プラスチック^{*7}や炭素繊維強化プラスチック^{*8}が少なく、繰り返しリサイクルしても物性の低下が少ないことが知られる。また、経年劣化した CNF 強化樹脂もバージン材^{*9}に 30%以下の比率で混合すればバージン材とほぼ同等の機械特性を維持するとの報告もある²³⁾。

CNF 強化樹脂による建築物が経年劣化した場合、劣化した CNF 強化樹脂をバージン材に混合し、バージン材と同等の機械特性を維持させた上で、CNF 強化樹脂建築としてマテリアルリサイクルする。機械特性が維持できなくなった場合にはじめて燃料としてサーマルリサイクルする。このような、段階を踏んだ、より質の高いリサイクルが実現できる可能性がある (図 19)。

PKS（ヤシ殻）からポリエチレン/CNF複合剤へ （マレーシアプトラ大学+金沢工業大学）

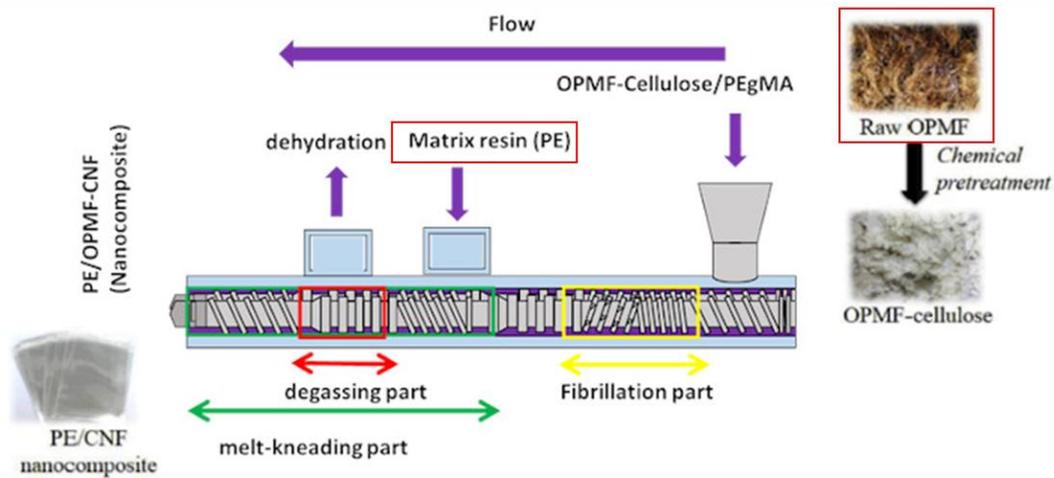


Figure. One-pot extrusion process (PE/OPMF-CNF)

<https://www.mdpi.com/2073-4360/12/4/927/htm>

図 18. 廃植物（PKS）からの CNF 複合材の生産



図 19. CNF 樹脂（3D プリンターフィラメント）のカスケード利用

3-4 廃食用油、廃植物・木材の回収方法

家庭から出る廃食用油のリサイクルは進んでいないのが現状であり、今後恒久的に廃食用油を回収するにあたっては、回収する文化を生活者に根付かせることが最重要であると考えた。そこで以下の方法を提案する。自治体か

ら補助金を出し、生活者が多数行き交う店舗（コンビニやスーパーマーケット等）に廃食用油の回収ボックスを設置する。各家庭や小規模飲食店から廃食用油を回収ボックスに持参することで、各店舗のポイントが付与されるシステムを構築する。樹脂生産企業により定期的に回収ボックスから廃食用油を回収する（図 20）。このような仕組みを作ることで、生活者にとっても廃食用油回収によるメリットが生まれ、積極的な回収が見込めると考えられる。

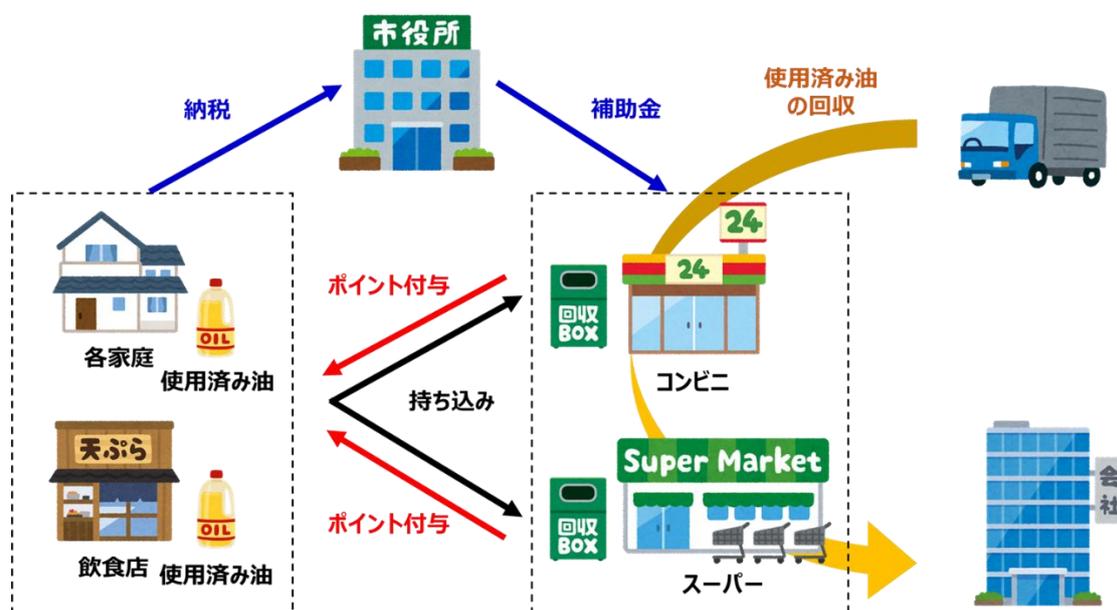


図 20. 廃食用油の回収方法の提案

3-5 3Dプリンターと油脂リサイクル素材による脱炭素建築の実現

前述のように、研究段階ではあるが、植物系樹脂と木質繊維を複合剤という完全バイオベース素材^{※10}を用いた3Dプリンター住宅も存在する。3Dプリンター建築の素材はセメント系材料だけではなく、植物系の複合樹脂も十分利用可能であることを示し、建築物等において炭素を含有する植物系の複合樹脂の利用を進めることは、炭素を住宅地に固定することを意味する。さらに、食用油の回収システムを構築することで、今までリサイクルされず、焼却廃棄されてきた食用油を有効に複合樹脂素材として活用することで、さらに強力に脱炭素化に貢献できると考えられる。

ただし、現在の日本では、複合樹脂3Dプリンター住宅を建築する場合、

建築確認申請が不要な現場でしか導入できないという大きな制限がある。

建築確認申請が不要になるのは、

1. 10m²以下の建築物であること
2. 増築・改築・移転であること（新築の場合は不可）
3. 防火指定のない地域（防火地域・準防火地域以外の地域）であること

となり、建築確認申請が必要な現場の場合、3Dプリンター住宅の仕様が建築基準法と適合しないため建築できない。しかし、国内の法規制の中でも、少しでも多くの家が必要な災害現場での小さな仮設住宅や、10m²以下でも趣味の部屋として使用するなどの需要も考えられる。また、海外ではすでに実現している将来性のある建築方法であり、今後の法制度の改正や技術革新により日本でも導入される可能性を期待したい。

3-6 建築コスト

モデルケースとして一般的な128m²(約39坪)の家一棟を、PHBH+CNFを原料として3Dプリンターを用いて建築するためのコストを試算した。試算方法として一般的な木造住宅一棟を建築するために必要な木材量から、同等の強度を保つのに必要なPHBH+CNF量のコストをまずは算出することとした。全国木材組合連合会によると150m²の家を建築するために29m³の木材が必要であり²⁴⁾、128m²の家では木材が約25m³必要である。日本家屋で使用される代表的な木材であるヒノキを使用すると仮定すると、その比重は0.41であることから²⁵⁾、 $25\text{m}^3 \times 0.41 = 10.25$ トンの木材が必要となる。また、ヒノキの強度の指標の一つとして曲げ弾性率^{*11}は750kgf/cm²であることが知られている²⁶⁾。一方で、PHBH+CNFの強度に関する報告がないことから、樹脂の一種であるポリアセタールに10%CNFを混合した際の曲げ弾性率と同等と仮定すると、その値は1,316kgf/cm²である²⁷⁾。よって、ヒノキと同等の強度を持たせるために必要な家一棟あたりのPHBH+10%CNF量は、 $10.25 \text{トン} \times (750/1,316) = 5.84$ トンとなる。しかしながら、3Dプリンターならではの設計手法によって内部を中抜き化することにより、強度を維持したまま使用材料を60%以下に削減できる技術が開発されており^{28, 29)}、これを活用すると、PHBH+10%CNFの必要量は $5.84 \text{トン} \times 60\% = 3.5$ トンまで削減できる。

次に、PHBH+10%CNF 3.5 トン生産するために必要なコストを試算した。PHBH の生産コストは不明であったため、PHBH と同様に植物油から細菌により生産される樹脂である PHA (Polyhydroxyalkanoate) の生産コストが約 726 円/kg と推定されていることから³⁰⁾、これを PHBH の生産コストと仮定した。また、CNF の生産コストは約 5,000 円/kg の報告があるので³¹⁾、この金額で算定した。これらの算定結果から PHBH+10%CNF の生産コストは 1,226 円/kg となり、3.5 トン分では 429 万円と推定できる(図 21)。

次に、PHBH+10%CNF を原料として 3D プリンターで建築物を作成し、それを現場に輸送して組み上げ、建築にかかる費用を試算した。3D プリンターを用いて 10m² の家を 23 時間で建築された実績があることから³²⁾、128 m² では 3D プリント作製に 300 時間必要と仮定し、機器オペレーター(1 人)の時給を 2,500 円とすると、プリントにかかる人件費は 2,500 円/時間×300 時間=75 万円と試算し、さらにプリントにかかる電気代は 20 万円と算出した。また、建築物の現場への輸送費を 10 万円、現場での組み立て費を 8 万円と算定し、ここまでの小計 542 万円となった。さらに、一般的な住宅建築に必要な上・基礎工事 98 万円、内装工事 100 万円、雑工事 33 万円を追加して³³⁾、合計 773 万円と試算した(図 22)。この金額は、同等の広さで従来の木造住宅での平均的な本体工事費 1,455 万円と比較して約 5 割のコストで建築可能であることを示しており、今後、技術進化により CNF のコスト等がさらに下がれば、より安価に建築できるものと考えられる。

家一棟建築するのに必要な木材量から、同等の強度を保つのに必要なPHBH+CNF量のコストを算出

128mm²(約39坪)に必要な木材(ヒノキ)使用量：約25m³ = 25×(ヒノキの比重)0.41 = 10.25トン

ヒノキ 曲げ弾性率：750 kgf/cm²

POM(樹脂;ポリアセタール) + 10%CNF 曲げ弾性率：1,316 kgf/cm² (PHBH + 10%CNFの曲げ弾性率と仮定)

ヒノキと同等の強度を持たせるために必要な家一棟あたりの樹脂量：10.25トン × (750/1316) = 5.84トン

3Dプリンターによる内部肉抜き化により40%以上軽量化可能

5.84トン × 0.6 = 3.50トン(必要量)

PHA(PHBHと同様に植物油から細菌により生産される樹脂;ポリヒドロキシアルカノエート)の生産コスト：726円/kg (PHBHの生産コストと仮定)

CNFの生産コスト：5,000円/kg

PHBH + 10%CNFの生産コスト = 1,226円/kg

1,226円/kg × 3.50トン = 429万円 (約39坪の家を建築するのに必要な材料費)

39坪の家を建築するのに必要な材料費は429万円

図 21. 家一棟建築するのに必要な PHBH + CNF の材料費

- 骨格の材料費：429万円
- 3Dプリント作製費(工場にて作製し輸送)：
機器オペレーター(時給2,500円×300時間)：75万円
*3Dプリンターで10平米(3坪)の家を23時間で建築実績あり
- 電気代：20万円
- 運搬費：2トントラック2往復 10万円
- 工事費：8時間 4人(時給2,500円):8万円

小計 542万円

- 上・基礎工事 98万円
- 内装工事 100万円
- 雑工事 33万円

合計 773万円

従来の木造住宅の本体工事費(1,455万円)と比較して
約5割のコストで建築可能

工事種目・科目	金額(円)	構成比(%)
仮設工事	724,062	3.1
上・基礎工事	981,120	4.2
木工事	6,816,036	29.2
屋根・板金工事	660,866	2.8
石・タイル工事	264,440	1.1
左官工事	148,417	0.6
金属製建具工事	1,628,835	7.0
木製建具工事	1,028,370	4.4
内外装工事	1,703,577	7.3
塗装工事	261,980	1.1
雑工事	330,211	1.4
小計	14,547,914	62.2
設備工事	2,483,040	10.6
衛生器具設備	169,800	0.7
給排水・給湯設備	968,824	4.1
電気設備工事	811,520	3.5
小計	4,433,184	19.0
付帯工事	442,100	1.9
冷暖房設備	906,940	3.9
小計	1,349,040	5.8
直接工事費計	20,330,138	87.0
諸経費	3,049,521	13.0
工事費合計	23,379,659	100.0
消費税	1,168,983	-
総計	24,548,642	-

従来の木造住宅よりも低コストで建築が可能

右表は(財)日本木材総合情報センター，木材利用相談 Q&A100，2023/05/30，

<https://jawic.or.jp/qanda/index.php?no=19> より抜粋

図 22. PHBH + CNF で家一棟建築するためのコスト

3-7 脱炭素3Dプリント住宅による住まい方の転換

環境にやさしいエコスタイルハウスを提案するなかで、「家」というものを再考した。従来、「家」は世代をまたぎ受け継ぎ、世代を超えて守るものという考えが潜在意識にあると思われる。多くの人にとって一生に一度、最

大の買い物である。しかし、一旦「家」を建てると、多額の住宅ローンを抱え、自由に引っ越すこともできず、将来的には、子供の独立や伴侶の死別など「家」に住むべき「個」がいなくなり、最終的には引き取り手のない「空き家」が生まれ、膨大なエネルギーを消費し処分される。このように、「個」の生活を守るべき「家」が、逆に、「個」の生活を大きく制限するだけでなく、社会全体の負担となる。

3Dプリンター住宅は建築期間が短いことが特徴で、建築期間 23 時間ほどで建てられた事例があるほど通常の住宅では不可能なスピードで住宅が建てられる。これは、今までより住宅における改築のハードルを大幅に下げたと考えられる。100 年の風雪に耐える頑強な「家」も魅力的ではあるが、次の世代に引き継ぐことを前提とせず、多少脆弱であっても、人生における結婚、出産などライフステージに合わせて増減築可能な、自由度の高い「家」も十分に価値があるのではないだろうか(図 23)。

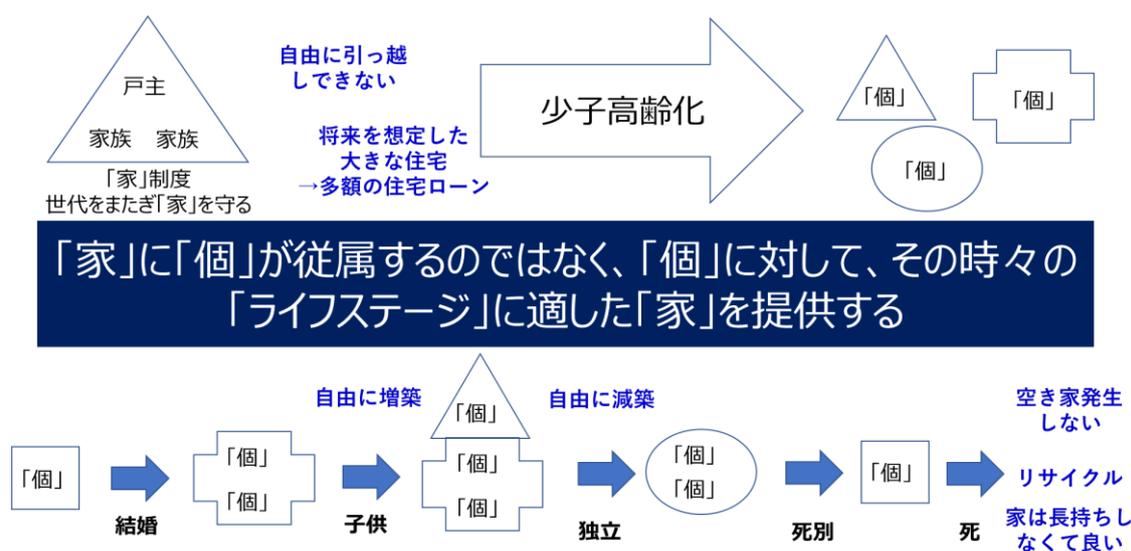


図 23. ライフステージにあわせた「家」の「在り方」

おわりに

急速に進む地球温暖化により、一昔前の異常気象が当たり前になっていることは誰もが実感するところである。脱炭素社会の実現は喫緊の課題であり、すでに我々には時間的猶予は残されていない。しかし、この状況にいたって

も、大気中へのCO₂排出量は増加しており、生活者は、なかなか従来の化石燃料に頼った便利な生活を大きく変えることは出来ない。

脱炭素社会に適した環境にやさしい素材を探索して、従来の素材を代替することは重要である。本論文では、現在、十分にリサイクルされていない家庭の食用油に着目し、これを原料とする PHBH 樹脂を CNF で強度を増し、新たな建材として利用することを提案した。ただし、紫外線や風雪など厳しい自然環境に対する耐久性等、いくつかの技術課題が残されている。これらの技術課題を解決した後に、圧倒的なコストメリットが残るかという壁が立ち上がることも予想される。

CNF 価格（約 5,000 円/kg）はエコスタイルハウスの価格を上げる大きな一因ともなっている。しかし、複合樹脂に用いられる他の繊維材料、例として、ガラス繊維は価格が低く、製造までの温室効果ガス排出の観点で有利だが、不燃性でありサーマルリカバリーが困難であるなど、リサイクル性に課題がある。環境に配慮した 3D プリンター住宅には CNF を使用する必然性がある。住宅市場の規模は大きく、一旦、エコスタイルハウスが普及すれば、CNF 市場が拡大し、CNF の市場価格が大幅に低下することが期待できると考えると、いかにエコスタイルハウスを普及させるための価値を付与するかが大切である。

エコスタイルハウスは、コストとは異なる新たな価値を与える。3D プリンターのロボットアームは自動で構築するため 24 時間体制の製造が可能であり、製造工程も短縮され、建設業界の抱える長時間労働や労働力不足などの課題を解決する。さらに、エコスタイルハウスを一つのきっかけとして、油脂産業の持つ様々な環境技術を生かしたエコスタイルハウスでの街づくりを進め、インフラ産業へ大きく貢献することも可能ではないだろうか。

建築家の隈研吾氏はメーカー（株式会社植田板金店）と共同で、あらたな住まいのあり方としての小屋を提案している。隈研吾氏の言葉を一部引用する。「今、人間の住まい方が非常に大きな転換期に来ています。簡単に言えば、20 世紀の工業化社会では都会のコンクリートマンションが中心でしたが、今後は人口が減って少子高齢化が進むので再び自然に戻ることになる。その時に最も面白いのが小屋なんです。・・・」³⁴⁾。

この言葉通り、生活者の「家」に対する考えが大きな変革の時期に差し掛かっていると思われる。20世紀の工業化より、都市部にコンクリートマンションが林立し、地方の過疎化、都市への一極集中、同時に、核家族化、さらには少子高齢化が進むなか、家屋や墓などを誰が引き継ぐのか多くの人が悩んでいる。明治時代の「家」制度の名残として、「家」は世代をまたぎ引き継ぐものという考えが現代に合わなくなったことによるものと考えられ、新しい「家」の在り方が求められている。

次の世代に引き継ぐことを前提とせず、人生における結婚、出産などライフステージに合わせて増減築可能な、自由度の高い手軽なエコスタイルハウスは、新しい「家」の在り方として多くの方から共感を得られると期待される。

エコスタイルハウスは、生活者にコスト的な魅力を提供するだけでなく、新しい「家」の在り方への共感を呼び起こし大きく普及することで、労働力不足や空き家問題などの現在の社会課題の解決に貢献する。さらには、油脂産業とインフラ産業がお互い手を握りあい、エコスタイルハウスによる街づくりを実現することにより日本において脱炭素社会を早期実現し、この取り組みを世界に展開することで、グローバル環境問題（エネルギー、温暖化）を解決し、さらに住みよい地球環境を世界の子供たちに約束する。

注釈

※1【PKS】パームヤシ殻。パーム油を生産する過程で発生する副産物。Palm Kernel Shell の略。

※2【サーマルリサイクル】廃棄物を焼却したときの熱エネルギーを再利用するリサイクル手法のこと。

※3【パーティクルボード】木材を削った細片やチップを固めて、接着剤で圧着成型した板状の製品。

※4【カスケード利用】高レベルの利用から低レベルの利用へと、多段階（カスケード）に活用すること。

※5【遺伝子組換え技術】ある生物が持つ遺伝子(DNA)の一部を、他の生物の細胞に導入して、その遺伝子を発現(遺伝子の情報をもとにしてタンパク質が合成されること)させる技術のこと。(農林水産省 WEB ページより抜粋)

※6【ヨウ素価】油脂 100 g に付加することのできるヨウ素のグラム数のこと。この値が大きいほど試料中の脂肪酸の不飽和度が高いことを示す。

※7【ガラス繊維強化プラスチック】樹脂プラスチックにガラスなどの繊維を混合させ、強度をアップさせた複合材料。

※8【炭素繊維強化プラスチック】樹脂プラスチックに炭素繊維を混合させ、強度をアップさせた複合材料) に比較して、マテリアルリサイクル時の線維破断(線維が破断し、一本当たりの線維長が短くなること)。

※9【バージン材】新品の素材のみを使って製造した製品。

※10【バイオベース素材】石油化石資源ではなく、生物由来であるバイオマスより製造された素材。

※11【曲げ弾性率】どれくらいの曲げ応力に耐えられるかを示す値。曲げ強度試験においては、二つの支点到に試験片を水平に乗せ、中央上部よりクサビで曲げ荷重を与える。試験片が破断する際の最大荷重で表す。(株式会社 KDA WEB ページより抜粋)。

参考文献

- 1) OECD, OECD data, 2023/09/15,
<https://data.oecd.org/earnwage/average-wages.htm>
- 2) 内閣府, 日本経済 2022-2023, 2023/05/30,
https://www5.cao.go.jp/keizai3/2022/0203nk/n22_0_0.html
- 3) 国土交通省, 国土交通白書 2020, 2023/05/30,
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/html/n1111000.html>
- 4) 国土交通省, 空き家対策の現状について, 2023/05/30,
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001429587.pdf>
- 5) 国土交通省, 空き家の現状と課題, 2023/05/30,
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001426966.pdf>
- 6) ヒューマンタッチ株式会社, 国内の人材市場動向数値（建設業界編）建設業界の転職支援と人材育成のヒューマンタッチ 4月まとめ, 2023/4/16,
<https://www.athuman.com/wp-content/uploads/2021/04/21003T-2.pdf>
- 7) 一般社団法人日本建設業連合会, 建設工事を発注する民間事業者・施主の皆様に対するお願い, 2023/04/03,
<https://www.nikkenren.com/sougou/notice/index.html>
- 8) 環境省, 令和3年度廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ検討業務報告書, 2023/05/30,
<https://www.env.go.jp/recycle/report/r4-05/index.html>
- 9) 全国油脂事業協同組合連合会, UCオイルのリサイクルの流れ図（令和3年度版）, 2023/05/30,
https://zenyuren.or.jp/document/220407_ucorecycleflow_r3.pdf
- 10) マックスワールド株式会社, パームエナジーニュース パーム椰子殻（PKS）輸入価格と輸入量の推移【最新】, 2023/03/10,
https://indonesia-palm.com/news/palm_basics/4587
- 11) 日本木質バイオマスエネルギー協会, 地球温暖化対策に貢献する木質バイオマスエネルギー, 2023/03/10,
<https://jwba.or.jp/woody-biomass-energy/prevent-global-warming/>

- 12) みずほリサーチ&テクノロジーズ, 木質廃材リサイクルの課題と循環型利用拡大の可能性, 2023/02/26,
<https://www.mizuho-rt.co.jp/publication/mhri/research/pdf/report/report05-0916.pdf>
- 13) 株式会社大林組, 3D プリンター実証棟「3dpod™」が完成, 2023/04/17,
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230425_1.html
- 14) Azure Printed Homes, 2023/04/17,
<https://www.azureprintedhomes.com/post/fast-company-featured-azure-printed-homes-in-an-article-about-sustainability>
- 15) THE UNIVERSITY OF MAINE, UMaine News, First 100% bio-based 3D-printed home unveiled at the University of Maine, 2023/04/17,
<https://umaine.edu/news/blog/2022/11/21/first-100-bio-based-3d-printed-home-unveiled-at-the-university-of-maine/>
- 16) パナソニック株式会社, 70%高濃度セルロースファイバー成形材料を開発, 2023/02/23,
<https://news.panasonic.com/jp/press/data/2021/02/jn210204-1/jn210204-1.pdf>
- 17) 松本圭司, 生物工学会誌, 第 94 巻第 5 号, (2016) p242-246
- 18) 佐藤俊輔ら, 生物工学会誌, 第 97 巻第 2 号, (2019) p66-74
- 19) 佐藤俊輔, 生物工学会誌, 第 100 巻第 9 号, (2022) p494-497
- 20) (公)京都高度技術研究所, 令和元年度、2 年度、3 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 (PHA 系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業) 委託業務成果報告書, 2023/05/30,
<https://www.env.go.jp/content/900534519.pdf>
<https://www.env.go.jp/content/900534535.pdf>
<https://www.env.go.jp/content/000038650.pdf>
- 21) 矢野浩之, セルロースナノファイバー補強によるバイオマスプラスチック用途拡大の推進, 2023/05/30
https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/interim_presentation/1G-2101.pdf

- 22) 金沢工業大学, 植物由来の複合材料を自動車に適用目指す。パームヤシを有効利用したセルロースナノファイバー (CNF) を国際共同研究。、
2023/05/14,
https://www.kanazawa-it.ac.jp/kitnews/2020/0421_cnf.html,
- 23) 環境省, 脱炭素・循環経済の実現に向けたセルロースナノファイバー利活用ガイドライン, 2023/02/24,
<https://www.env.go.jp/content/900441261.pdf>
- 24) (社)全国木材組合連合会, 木を学ぶ, 2023/05/30,
<https://zenmoku.jp/ippan/faq/faq/faq2/214.html>
- 25) 木材博物館, ヒノキ, 2023/05/30,
<https://wood-museum.net/hinoki.php>
- 26) 「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト, 木材の強度ランキング一覧, 2023/05/30, <https://www.toishi.info/sozai/woods/kyoudo.html>
- 27) プラスチック・ジャパン(株), セルロースナノファイバー入門(4) CNFと樹脂との混練物を作る, 2023/05/30,
<https://plastics-japan.com/archives/5003>
- 28) (株)リコー, 「3Dプリンターならではの」設計とは?, 2023/05/30,
<https://blogs.ricoh.co.jp/3dp-expert/column/detail17.html>
- 29) 北本和也ら, 非破壊検査, 第70巻第7号, (2021) p254-260
- 30) 加部泰三ら, 繊維学会誌, 第75巻第3号, (2019) p162-168
- 31) 野尻昌信ら, 森林総合研究所研究成果選集, (2020) p32-33
- 32) Yahoo ニュース, 今春発売「24時間」で建つ「500万円」の一戸建て 意外にも「60歳以上」から問い合わせが殺到する理由, 2023/05/30,
<https://news.yahoo.co.jp/articles/90bd5e01a4934f1ef6374936d41d15eefc4fab6f>
- 33) (財)日本木材総合情報センター, 木材利用相談 Q&A100, 2023/05/30,
<https://jawic.or.jp/qanda/index.php?no=19>
- 34) SUMIKA, 「少子高齢化」と「人口減少」、その時に最も面白いのが「小屋」。隈研吾デザイン「小屋のワ」の連帯できる小屋, 2023/07/20,
<https://sumika.me/contents/12859>