

氏 名 (本 国 籍)	上 田 裕 之 (三重県)
学 位 の 種 類	博士 (農学)
学 位 記 番 号	農博甲第 7 9 6 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 5 年 3 月 1 3 日
研 究 科 及 び 専 攻	連合農学研究科 生物資源科学専攻
研究指導を受けた大学	岐阜大学
学 位 論 文 題 目	Research on Environmental and Scientific Issues in Carbon Fiber-Reinforced Plastics (CFRP) Recycling (炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のリサイクルに おける環境科学的課題に関する研究)
審 査 委 員 会	主査 岐阜大学 教 授 岩 澤 淳 副査 岐阜大学 教 授 岩 橋 均 副査 産 総 研 教 授 堀 江 祐 範 副査 岐阜大学 助 教 日 巻 武 裕

論 文 の 内 容 の 要 旨

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量かつ高強度という特性から、航空機や自動車等の構造部材として広く使用されている。しかしながら、非常に硬く、化学的に安定した材料であるため、ここ数年、廃棄された CFRP の処理が大きな問題となっている。価格や環境負荷(エネルギー消費量、LCA 等)の側面で、適切な処分方法が未だなく、その結果、比較的安価な埋立処理が優先されているのが実情である。米国では、CFRP 製の退役航空機が適切な処理方法がないため、砂漠等に放置されていることが問題となっている。

我が国においては、「循環型経済ビジョン 2020」(2020 年 5 月 22 日 METI 発行)において、リサイクルシステムの検討が急がれる 5 分野(プラスチック、繊維、CFRP、電池、太陽光パネル)の 1 つに CFRP が指定されている。一方、ドイツでは、2005 年から未処理 CFRP 廃棄物の埋立が原則禁止されている。つまり、世界的に、リサイクル/リユースシステムの構築が急がれている状況といえる。

本研究では、最初に、CFRP のリサイクル技術を普及させるための課題について、我が国に照らし合わせて整理を行った。その結果、CFRP のリサイクル工程では、必然的に炭素繊維(CF)の微粒子(ダスト/ミルド)が副産物として生成し、リサイクル技術の確立が急務ではあるものの、リサイクルの技術開発の側面のみが注目され、2 次的なダストを含む CF 微粒子が、生態系にどのような影響を与えるかについては、ほとんど分かっていないことが明らかとなった。加えて、CF が、やがてナノスケール化し、NOAA(Nano-objects, and their aggregates and agglomerates greater than 100 nm)と呼ばれる、健康への影響が非常に懸念されている凝集体になる可能性があることも明らかとなった。

このような背景から、本研究では、メダカを用いて CF の毒性評価を実施した。CFRP のリサ

イクル工程で発生する CF ダストが、副産物として非意図的に水環境中に放出された際の環境及び生物への影響について研究を行った。将来的にリサイクルが普及し、リサイクル品が日常生活において大量に使用されるようになった際の対策策定の際にも役立つと考えた。

さらに、NOAA を含む CF 粉塵のコントロールバンディングアプローチ(CB)による労働安全衛生面のリスク評価を、中小零細企業の実際の作業現場へ適用し、実施した。

今後、リサイクル CF の利用が拡大し、工場内の廃棄物やスクラップだけでなく、使用済みの電動車両等に付随する廃棄物の排出も予想されている。本研究では、なぜ CFRP のリサイクル事業や技術が確立されていないのか、我が国の産業面の課題について整理した。その結果、リサイクルを進める上で、環境・健康・安全(EHS)面の課題が依然残っており、リサイクル品の品質保証や評価手法の確立・標準化など、様々な課題がある中で、特に我が国においては CF 自体の毒性に関する科学的根拠情報が少なく、十分な検証なしに無毒な物質として扱われていることが明らかとなった。このような状況にもかかわらず、工業プロセスで処理された粉碎された短繊維等の微粒子が吸入によりヒトの肺胞に到達する可能性があることや、CF 表面に付着したダイオキシン類等の不純物が粉塵に毒性を付与するため、リサイクル工程での焼成処理や管理方法によっては、CF が毒性を示す可能性があることが過去の論文の検証等から見えてきた。

課題を順に整理した結果、CFRP のリサイクルや加工方法の改善は、環境や消費エネルギーの側面だけでなく、生物や健康影響とも関連するため、非常に重要であることが明らかとなった。また、今回、CFRP のリサイクル工程で発生する CF ダストが、副産物として非意図的に水環境中に放出された際に、環境や生物にどのような影響を与えるかを検討するため、水槽実験により、リサイクル CF 共存下でのメダカに対する影響を確認した。その結果、CF には顕著な毒性は認められないものの、突き刺さることでメダカを傷つけることを確認した。実験モデルのような、人工的な環境中では、メダカについた傷は自然と治癒されることが予想されるが、実環境、特に BOD 等の高い、汚染された環境中では、微生物による感染率が高くなることが危惧される。水域に流入する CF ダストは、現時点では微量ではあるものの、今後の廃棄やリサイクル事業の増加に伴い、その量が増加することが予想され、今後、大量に排出された際には、魚類等の水生生物への影響が懸念される。

中小零細企業の CFRP リサイクル関連の研究室にて、大気サンプリングを行った結果、CF 関連作業終了後もしばらくの間、室内空気中に CF が残存していること、そして 0~20 μm の微粒子の存在が確認され、作業場での懸念すべき事実が明らかとなった。加えて、リサイクル CF 微粉末の職業ばく露評価の一環として、既存の CB 法を適用させたリスク評価を行った結果、CB 法は中小零細企業が従業員の安全管理対策を検討するための第一歩として、有用であることが明らかとなった。

審 査 結 果 の 要 旨

申請者上田裕之は、先ず、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のリサイクル技術を普及させるための課題について、特に我が国に照らし合わせて整理した。その結果、CFRP のリサイクル工程で生成する微粒子が、生態系にどのような影響が未知であること、さらに、微粒子がナノスケール化し、NOAA(Nano-objects, and their aggregates and agglomerates greater than 100 nm)と呼ばれる、健康への影響が懸念されている凝集体

状になる可能性があることも明らかとなった。将来的にリサイクルが普及し、リサイクル品が大量に使用される際の対策のために、メダカを用いてダストの毒性評価を実施した。さらに、中小零細企業の実際の作業現場における労働安全衛生に貢献すべく NOAA を含む CF 粉塵のコントロールバンディングアプローチ(簡易的リスク評価)の適用を試みた。

審査委員会は、上記の内容が学術的に充分であることを確認した。

基礎となる学術論文

1) Ueda, H., Moriyama, A., Iwahashi, H. Moritomi, H
Organizational issues for disseminating recycling technologies of carbon fiber-reinforced plastics in the Japanese industrial landscape.
J Mater Cycles Waste Manag 23, 505–515 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s10163-020-01138-8>

2) Ueda, H., Fukuta, R., Ohno, T. Moriyama, A., Himaki, T., Iwahashi, H., Moritomi, H.
Assessment of biological effects and harm to Japanese medaka due to carbonized carbon fibers generated by a pyrolysis carbon fiber recycling process. J Mater Cycles Waste Manag 23, 1071–1080 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s10163-021-01191-x>

既発表学術論文

1) 上田 裕之, 小田 慎太郎, 森山 章弘, 岩橋 均, 守富 寛
コントロールバンディング手法を用いたリサイクル CFRP 製造・取扱現場のリスク管理の検討.
産業保健人間工学研究第 22 巻 第 1 号 (ISSN 1345-1731)(2022).