

Title	セルロースナノファイバーの計量書誌学的検討と工業的利用
Author(s)	足立, 零生; 宮下, 修人; 仙石, 慎太郎
Citation	年次学術大会講演要旨集, 39: 16-19
Issue Date	2024-10-26
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/19471
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

○足立零生, 宮下修人, 仙石慎太郎 (東京工業大学)

sengoku.s.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

セルロースナノファイバー (Cellulose nanofiber、CNF) は、木材の主成分であるセルロースを細かく解きほぐしたものであり、網目構造を有するナノファイバーである。ISO[1]では、植物素材を機械的に解繊したもので、幅 3-100 nm、アスペクト比 10 以上、長さ 100 μm までのものと定義される。また、熱膨張係数がガラスの 1/10 程度と小さく[2]、鋼鉄の 25 倍の強度[3]を持つなど、非常に優れた性質を持つ。加えて、木材由来であるため持続可能な資源と考えることができ、カーボンニュートラルの観点でも優れた物質である。そのため、高性能かつ環境に優しい資源であるとして注目を集めている。上記の性質から、CNF は色々な用途への応用が期待されている。応用例としては、透明性を活かした透明材料の補強材、ゴムや樹脂との複合材料、食品・化粧品への添加物、また、生体適合性の観点から、医療材料[4]、触媒[5]などが挙げられる。上記のように CNF は非常に優れた機能や性質を持っており、近年ますます注目を集めている。令和 2 年には、環境省でも「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」[6]が作成されており、また、近年の CNF に関連する発表件数の増加も顕著である[7]。実用化については、親水性 CNF が食品（どら焼きや桜餅）やトイレクリーナ、ボールペンのインキなど、複数の製品に応用されている。一方で、樹脂やゴムへの複合材料用途など、大規模な産業利用には至っていない。原因としては、既存材料と比較すると高価（3,000~10,000 円/kg）であることや、素材メーカーと製品メーカーとの意識の違いなどが指摘されている。その他にも、環境省の資料[6]では、今後の課題として、製造 / 輸送コストの低減、原料の安定供給、CNF 製品メーカーの発掘・マッチング、認知度の向上、リサイクルスキームの確立、不安感の払拭、CNF 製品の均一性などが挙げられている。

2. 研究背景と目的

CNF 関連分野における定量的な分析は、複数の文献で報告されている[7, 8]。特に、産業環境管理協会によるネットワーク分析[8]では、CNF に関連する研究の広がりや研究者間の連携状況が可視化されている。しかし、この分析では、“microfiber” や “microfibril” といった CNF 以外の繊維に関連する用語も含まれており、CNF のみを対象とした分析が不十分である。この背景には、CNF 関連用語の明確な定義や統一が不足していることが一因と考えられる。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による技術分野別の論文数推移[7]では、医薬、電気、バクテリア関連分野での論文数が近年増加していることが示されている。しかし、これらの結果は、“nanocellulose” というキーワードで収集された論文群に対して、それぞれの技術分野の特定用語が含まれているかどうかで件数を集計したものである。そのため、CNF 関連文献が十分に網羅されておらず、分析者の仮定に基づく範囲内でのしか結果が反映されていない可能性が高い。これにより、想定外の新たな用途や研究分野が見逃されていることが懸念される。このように、既存の計量書誌学的な分析では、CNF 関連分野の理解に貢献しているものの、用語の統一や広範な視点からの分析の不足という課題が残されている。

本研究は、上記の課題認識の下、CNF の工業的利用を促進するために、現状の研究動向を体系的に把握し、今後の実用化に向けた課題を明確にすることを目的とする。この目的を達成するために、以下のリサーチ・クエスチョン (RQ) を設定した。

- ・ 産業応用の観点から、注力すべき CNF 関連の研究領域はどこか (RQ1)
- ・ これらの領域における CNF の事業化のために必要な施策は何か (RQ2)

RQ1 については、論文に対する計量書誌分析を行い、CNF 研究の動向を体系的に調査・分析した。これにより、どの研究領域で進展が著しいか、またどの分野で成長が期待されるかを明確にし、CNF 関連の研究者や企業にとって有益な情報の抽出に努めた。RQ2 については、CNF 提供企業へのインタビュー調査を実施し、企業が直面している技術的および実用的な課題を明らかにした。これにより、工

業的利用に向けた具体的な障壁を特定し、その解決に向けた方策を提案した。本研究は、これらの結果を基に、CNF のさらなる研究開発および事業化を推進し、持続可能な素材としての普及に貢献することを目指す。

3. 方法

3.1. 計量書誌分析

CNF 関連文献における研究分野の動向を調査するために、計量書誌分析を用いた。計量書誌学とは、学術文献、書籍や雑誌の記事を対象に、計量的に解析・研究する学問であり[9, 10]、従来の主観的な視点が中心であった文献レビューとは異なり、研究分野を客観的にとらえることができる[11]。計量書誌分析には、共著分析[12]、書誌結合分析[13]、共引用分析[14, 15]、共語分析[13]などの様々なアプローチがある。本研究では、共引用分析を実施した。共引用分析とは、二つの文献が同時に他の一つの文献から引用される共引用を利用した分析方法である[14]。共引用の頻度が高いほど、二つの文献の関連性が強いと見なされる[15]。共引用分析によって、研究分野の構造や発展を明らかにし、注目度の高い文献を特定することを目指した。データの収集は、Web of Science データベースから、CNF 研究の書誌データを抽出した。検索キーワードは、CNF 関連研究を網羅するために、“nanocellulose”、“cellulose nanofiber”、“microfibrillated cellulose”、“nanofibrillated cellulose”、“bacterial nanocellulose”、“nanocrystalline cellulose”、“cellulose nanocrystal”、“cellulose nanowhisker”、“cellulose whisker”とし、どれか1つでもキーワードが含まれている文献を対象とした。

3.2. インタビュー調査

RQ2 に関する調査として、半構造化インタビュー[16]を実施した。調査対象は、CNF 製造企業の専門家4名で、各自に対し1時間程度のオンラインインタビューを実施した。インタビューの趣旨と計量書誌分析の結果を説明した後、下記の2点を中心に質問を行った。

1. 分析結果に関する解釈について

- ・意見が異なる箇所とその理由
- ・意外だと感じた点や気づき

2. 今後、CNF の工業的利用に向けて必要なことや研究について

- ・研究成果と実用化に差があると考える分野
- ・特定の領域に関して、今度どのような研究が必要であると考えるか

4. 結果

4.1. 計量書誌分析

1900年1月1日から2023年12月31日の間に発表された原著論文を対象とした。最終的に、15,198件の論文が検索された。まず、計量書誌分析を用いて共引用ネットワークを可視化した。可視化には、VOSviewerを使用した。これは、van Eck と Waltman によって開発された書誌ネットワーク視覚化ソフトウェアで計量書誌マップの作成と表示に広く使用されている[17]。ノードのサイズは、アイテムの重みを示し、ノード間の距離は、関連性を表す[18]。共引用ネットワーク可視化の設定として、分析単位を引用された文献、カウント方法をフルカウントとした。閾値は、最低引用数を4とした。最終的に、閾値を満たした文献数は30,157件である。文献数が10未満のクラスターは他のクラスターに統合した。また、各クラスターの合計リンク強度が上位10文献を確認し、それぞれのクラスターの属性を把握した。次に、クラスター別の平均出版年から、最新のトピックや古いトピックの算出を行った。具体的には、各クラスター内の全論文の出版年を平均し、平均出版年が近年に近いほど、現在、注目されている新しい研究領域であると判断した。一方で、平均出版年が過去であるほど、現在は研究されていない、古い研究領域であると判断した。最新および古いトピックを算出し、研究動向やトレンドを明確にすることを目指した。

共引用分析によって得られたネットワークを図1に示す。13のクラスターが得られた。クラスターの合計リンク強度上位10文献を確認し、クラスターの属性を特定した。また、各クラスターにおける論文の平均出版年数を算出した。得られたクラスターの属性と平均出版年を表1にまとめて示す。クラスター3の電子デバイス材料の平均出版年は2014.9年と最も新しく、次に、クラスター8のエマルジョンが2013.8年、クラスター2の多孔質材料(エアロゲル、発泡体)が2013.6年であった。一方、クラ

スター6の製造（TEMPO酸化）は2006.1年、クラスター9の複合材料（ナノウィスカー）は2009.4年、クラスター7のセルロースナノクリスタル（懸濁液）は2009.6年で、これらは平均出版年数が古かった。

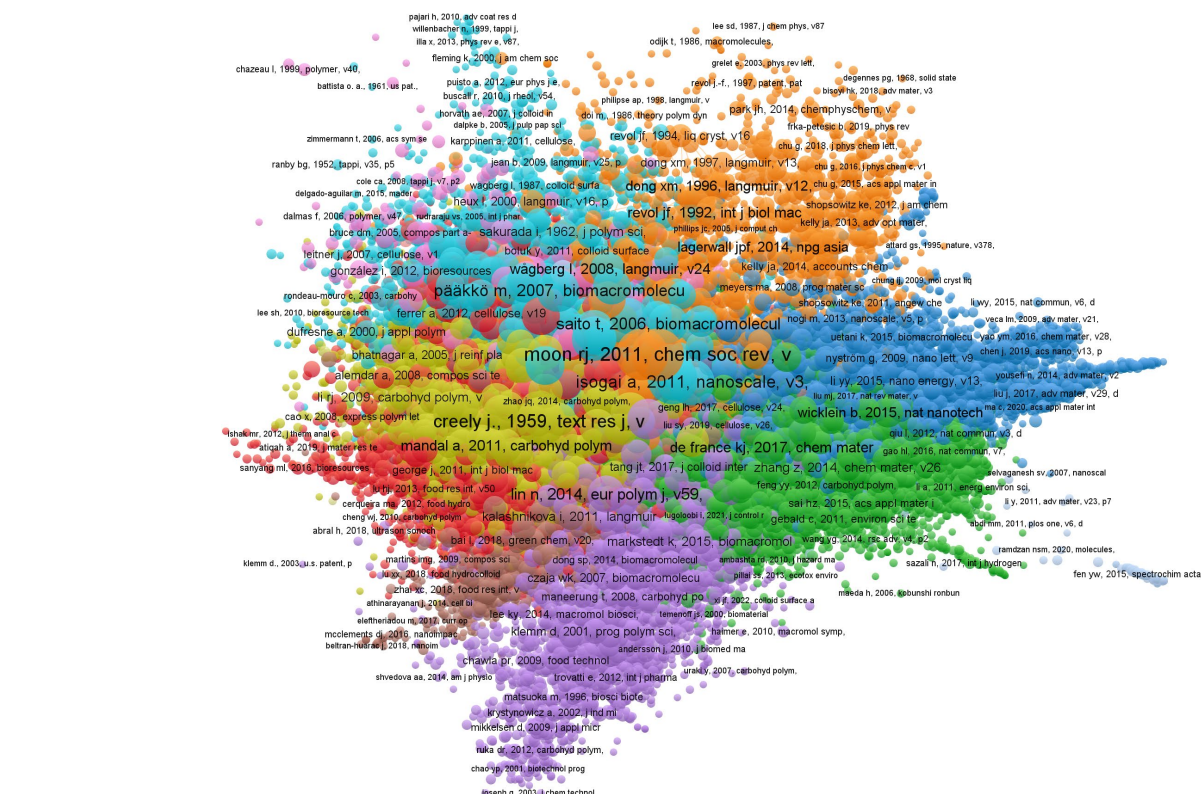


図 1. 共引用分析によるネットワーク図。

表 1. それぞれのクラスターの平均出版年と属性

クラスター	平均出版年数（年）	属性
1	2013.1	複合材料（コンポジット）
2	2013.6	多孔質材料（エアロゲル、発泡体）
3	2014.9	電子デバイス材料
4	2013.0	製造と評価（X線回折）
5	2012.7	生体材料（バクテリアセルロース）
6	2006.1	製造（TEMPO酸化）
7	2009.6	セルロースナノクリスタル（懸濁液）
8	2013.8	エマルジョン
9	2009.4	複合材料（ナノウィスカー）
10	2012.1	リン酸化 CNF
11	2011.3	複合膜
12	2012.0	表面修飾
13	2009.8	その他

4.2. インタビュー調査

インタビューの結果、CNF 関連産業の発展に向けた課題として以下の点が挙げられた。日本では、CNF の用途が樹脂のフィラーとしての利用に偏っており、実用化された分野では使用量が限られていること。また、CNF を効果的に活用できる新たな用途が不足していること。用途開発のための研究が進んでいるものの、外部への情報共有が進んでいないこと。さらに、代替材料としての検討

が多く、コスト競争で不利であることなどである。また、解決策としては、樹脂以外の用途を開発することが求められている。特に、顧客との共同開発やオープンイノベーションの推進を通じて、新たな可能性を模索する必要がある。また、CNF でしか実現できない機能や、物性向上に加えて副次的な効果を持つ領域の開拓が重要であると指摘された。

5. 考察

現在、CNF 技術の産業応用としては、エマルジョン技術が食品や化粧品分野での実用化が進み、多孔質材料技術は発泡体として応用され、市場に製品が出回り始めている。これにより、CNF の効果が実証されていると言える。今後は、個別の製品に留まらず、より広範な分野での応用が期待されている。たとえば、エマルジョン技術を使った塗料や接着剤への応用や、CNF を糸状に加工し、配向性を活かした新製品の開発が見込まれている。また、長期的には、生体材料としての応用も期待されているが、認可や規制の課題により、実用化には時間がかかる可能性がある。これらの新たな応用が進めば、CNF の高付加価値な用途が広がり、量産化やコスト削減の推進につながると考えられる。

CNF 技術を産業として発展させるためには、以下の 4 つの戦略が重要である。第一に、新しい研究領域を開拓することが不可欠である。既存の用途にこだわらず、行政、大学、企業が協力し、幅広い分野での研究を推進する必要がある。また、オープンイノベーションを活用して、新しい可能性を探ることが求められる。第二に、CNF にしかない特有の機能や副次的な効果を追求することが重要である。代替材料としてはコスト面で競争が厳しいため、CNF の特性を活かし、高付加価値な製品を開発することで他の素材との差別化を図ることができる。第三に、「工業的利用」の再定義が必要である。当初より大量生産や低コスト化を目指すのではなく、まずは中規模市場をターゲットにして CNF の利用範囲を広げ、最終的に大規模市場へと展開していく戦略が重要である。最後に、シーズ（技術）とニーズ（市場）の一致が不可欠である。顧客との共同開発を通じて、消費者のニーズに合った製品を作り上げる必要がある。これらの施策を通じて、CNF の産業応用を加速することが可能になると考えられる。

謝辞

本研究のインタビューに協力頂いた匿名 4 氏に深謝する。

参考文献

- [1] ISO/TS 20477:2023
- [2] D. H. Page, et al., *Journal of Pulp and Paper Science*, **1983**, 9, 99.
- [3] T. Nishino, et al., *Macromolecules*, **2004**, 37, 7683.
- [4] H. Yano, *Journal of the Imaging Society of Japan*, **2016**, 55, 356.
- [5] M. Kaushik, et al., *Green Chemistry*, **2016**, 18, 622.
- [6] 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, 環境省, **2020**.
- [7] 2022 年度「セルロースナノファイバーの市場及び技術動向調査」報告書, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, **2022**.
- [8] セルロースナノファイバー利活用による CO₂ 排出削減効果等 評価・検証事業委託業務 成果報告書, 一般社団法人産業環境管理協会, **2019**.
- [9] Nicola D. B., *Bibliometrics and Citation Analysis: From the Science Citation Index to Cybermetrics*, Scarecrow Press, **2009**.
- [10] M. Aria, et al., *Journal of Informetrics*, **2017**, 11 (4), 959.
- [11] I. Zupic, et al., *Organizational Research Methods*, **2015**, 18 (3), 429.
- [12] K. Kurata, et al., *Sustainability*, **2023**, 15 (22), 15873.
- [13] Phan, T. L., *Cogent Business & Management*, **2021**, 8 (1), 1896885.
- [14] 中野 優, 他, 第 8 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM 2016), **2016**, F3-4.
- [15] H. Small, *Journal of the American Society for Information Science*, **1973**, 24, 265.
- [16] Flick, U., 質的研究入門 (小田博志・山本則子・春日常・宮地尚子 訳), 春秋社, **2011**.
- [17] Van E. N. J, et al., *Scientometrics*, **2010**, 84 (2), 523.
- [18] F. Ali, et al., *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, **2019**, 31 (7), 2641.