

未来を築く木質炭素：その秘めた力と可能性

畑 俊充^{1*}

Building the Future with Carbonized Wood: Its Hidden Power and Potential

Toshimitsu Hata^{1*}

概要

木炭は独自の特性と用途によって私たちの生活を豊かにし、環境保護に貢献する重要な素材である。木炭は古代から人類の歴史と深く結びついており、日本では炭焼き技術が文化と経済を支えてきた。その多孔質構造によって高い表面積を持ち、消臭、水浄化、土壌改良など多岐にわたる用途がある。本稿では、木炭の歴史的背景と製造方法、その特性と現代における利用法について詳細に解説する。特に、木炭を素材としてみた場合の名称である木質炭素の多孔質構造とその応用例を取り上げ、伝統的な利用方法と革新的な利用方法の両面から、その秘めた力と可能性を探る。持続可能な未来に向けた木質炭素の新たな役割を理解し、科学的根拠に基づいてその有効活用を進めることが重要である。本総説を通じて、木質炭素の特性と多様な利用法を探求し、その可能性を最大限に引き出すための知識を提供する。

1. はじめに

木炭は炭化によって生成するだけでなく、さまざまな用途や特性をもち、環境保護にも寄与する重要な素材である。木炭は古代から人類の歴史と深く結びついており、日本では炭焼き技術が文化と経済を支えてきた。愛媛県の古代洞窟から発見された 30 万年前の木炭片は、木炭が人類の歴史とどれほど深く結びついているかを物語っている。昔の日本では、「たたら」という方法で金属を作る技術が使われており、南九州や中国山地、南関東などのたたら跡という鉄製錬遺跡から、酸化鉱物の還元熔融用として用いられたとみられる炭塊が見つかった¹⁾。昭和 30 年代には炭の時代が終わりを迎え、多くの炭焼き職人たちが姿を消し、その結果、多くの山村が過疎化した。

最近、木炭が再び注目されている。その背景には、化石燃料の燃焼による地球温暖化の加速がある。木炭は化石資源由来の炭素材料ではなく木質炭素材料を用いるという意味で、木炭は地球環境負荷が比較的少ないため、大気中の二酸化炭素 (CO₂) を固定する能力を持っている。木炭の製造・利用は、樹木の成長過程で吸収された CO₂ を炭素として固定化し、空気中の CO₂ 濃度を減少させることができる。このため、木炭はダイレクトエアキャプチャ技術と同様に、経済活動に影響を与えずに温暖化ガス濃度を削減する可能性がある。また、木炭の製造方法は環境負荷が少なく、エネルギー効率の向上や廃棄物のリサイクルを推進することで、環境保護と経済発展の両立が可能である。木炭の再評価は、持続可能な社会の実現に向けた重要なステップとなる。

2024 年 9 月 6 日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 居住圏環境共生分野.

* E-mail: hata@rish.kyoto-u.ac.jp

地球環境を守るため、木炭を素材としてみた場合の名称である木質炭素の有効活用が科学的根拠と多くの人々の理解に基づいて進められることが重要である。木質炭素の特性と利用法についての研究が進められており、研究成果は木質炭素が生活の質向上や環境改善に寄与する重要な素材であることを示唆している（図 1）。ここでは、木質炭素の特性と、現代におけるその多様な利用法について解説する。

2. 木質炭素の定義と応用

2.1 木質炭素の定義と特徴

木質炭素は、木材を酸素が少ない状態で加熱して炭素化したもので、有機成分が分解される過程で炭素が豊富に残る。このプロセスにより、多孔質で軽量の特性が得られ、様々な用途に利用される。多孔質構造により、表面積が広く、吸着能力が高い。この特性を活かして、木質炭素は消臭材、浄水材、土壌改良材として利用される。さらに、持続可能な資源として環境保護にも貢献する（図 2）。

木質炭素の製造過程では、木材は酸素が少ない状態で加熱され、セルロースやリグニンなどの有機成分が熱分解する。これにより、多孔質の構造が形成され、軽量で吸着能力が高い木質炭素が生成される。特に、環境保護や農業分野での利用が期待されている。また、木質炭素の多孔質構造は、多くの用途で役立つ。例えば、消臭材として使用することで、悪臭の原因となる分子を効果的に吸着することができる。木質炭素の多機能性は、持続可能な資源としての利用価値を高めている。

木質炭素は、木材を酸素が少ない状態で加熱することで生成される炭素材料である。加熱により、炭素が結晶状に配列する部分（炭素結晶子）が形成される。炭素結晶子は、六角形の平面が積層して形成され、これはハチの巣状の形状に似ている。この炭素結晶子は、通常、約 600° C 以上で加熱されると形成されるとされており²⁾、これらの結晶子が集まり、「乱層構造炭素」と呼ばれる構造が形成される。この乱層構造炭素は、結晶子が三次元方向（上下左右前後）に無秩序に配列しているため、結晶学的な規則性がないという特徴を持つ。これにより、木質炭素は独自の物理化学的特性を有する（図 3）。

2.2 木炭の特性

木質炭素には元々の木材の組織がそのまま残っている。例えば、水や栄養分を運ぶ道管や仮道管がハニカム構造（ハチの巣型）の孔に変わる。これらの孔をつくる細胞壁中には、1nm 前後の非常に小さな孔（ミクロ孔）があり、木炭のミクロ孔は炭化する際に細胞壁内部に形成される。木質炭素は内部に多数の小さな孔（あな）を持つことが特徴である。これにより、木炭の表面積は大幅に増加する。木材を炭素化する時の特徴である固相炭素化とは、木材のような原料有機物が熱化学反応によって気化や熔融などを起こさず、原料固体の巨視的形狀を維持したまま、あるいはその変化が小さいまま進行する炭素化反応である（図 4）。

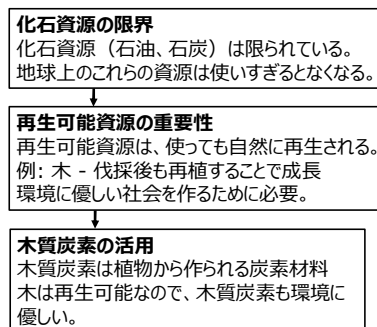


図 1. 再生可能資源からの木質炭素(木炭)の重要性

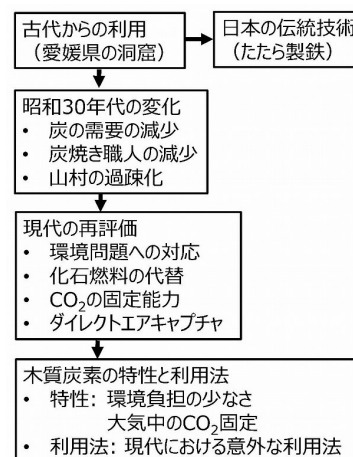


図 2. 木質炭素の歴史と現代の利用および環境保護への貢献

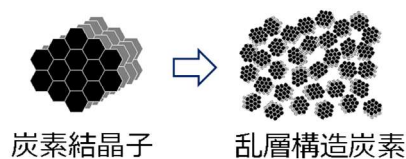


図 3. 木質炭素の定義と特徴

木炭の表面積は 1 グラムでテニスコートと同程度に達する。ミクロ孔は細胞壁の中に含まれており、木炭の表面積を大幅に増やす役割を果たしている。これは、穴が多い土地が平らな土地よりも表面積が広くなるのと同じ原理である。これらの孔は小さすぎて肉眼では見えないが、その特性は多様な用途で役立っている。

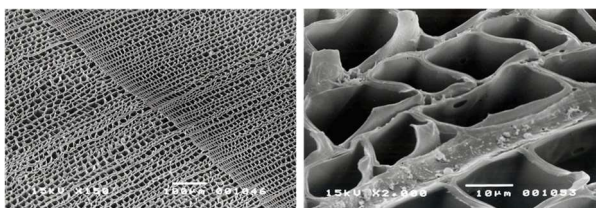


図 4. 固相炭素化は木質炭素の特徴のひとつである。

3. バイオ炭 (Bio-char) と木炭

バイオ炭と木炭は、いずれも有機物を高温で熱分解して得られる炭素材料である。木炭は主に燃料、調理、金属の精錬などに使用され、歴史的には暖房や料理、金属加工のエネルギー源として利用されてきた。一方、炭素捕獲と貯蔵 (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS) の素材として注目されているバイオ炭は、土壌改良と炭素隔離を主な目的として使用される。具体的には、光合成によって作られた細胞壁を炭素化することで得られた炭素を土壌に長期間固定化し、これによって空気中の CO₂ 濃度の減少に寄与する。

バイオ炭の製造温度は、その炭素残存率と共に、以下の 3 段階に分類されている。炭化温度が 600°C 以上の場合、炭素残存率は 0.89 である。450°C から 600°C の範囲では、炭素残存率は 0.8 である。さらに、350°C から 450°C の範囲では、炭素残存率は 0.65 である。このように、バイオ炭の炭化温度に応じて炭素残存率が異なることから、製造過程における温度管理が重要であることが IPCC (気候変動に関する政府間パネル) による報告書に示されている³⁾。一方、木炭は黒炭と白炭があり、黒炭の炭化温度はおおよそ 400~700°C の範囲で、その主な原材料としてはナラ、クヌギ、カシなどの木材が使用される。白炭の炭化温度は 800°C 以上と非常に高温で、原材料には、ウバメガシやカシ類などが用いられる⁴⁾。木炭は木材や他の有機物を酸素が制限された条件下で 400°C から 1200°C の範囲で熱分解・炭素化を行い、特に高温で炭素化される備長炭のように非常に硬く、長持ちし、優れた燃焼特性を持つ。

使用目的と製造方法には類似点が多いが、原料の選択には違いが見られる。木炭は主に木材が使用されるのに対し、バイオ炭ではもみ殻、稲わら、家畜の糞など、より多様なバイオマスが原料として利用される。これらの特性と用途を理解することで、バイオ炭と木炭はそれぞれ適切な場面での活用が可能となる。

4. 木質炭素の具体的な応用

木質炭素は、その吸着特性を活かして多くの分野で利用されている。例えば、消臭材として利用することで、悪臭の原因となる分子を効果的に吸着し、室内や冷蔵庫の臭いを除去することができる。また、浄水材としての利用も進んでおり、水から不純物を除去する能力に優れている⁵⁾。

木質炭素は土壌改良材としても利用され、植物の成長を促進する効果がある。木質炭素の多孔質構造により、土壌中の水分保持能力が向上し、肥料の効率的な利用が可能となる。これにより、作物の収穫量を増加させることが期待されている⁶⁾。

木質炭素は、その多孔質性と軽量性を活かして様々な用途に利用されている。細孔構造により表面積が増大し、ガスと木質炭素の接触面が広がることで、反応速度が向上し、熱分解およびガス化反応の効率が高まる。また、軽量性によって輸送コストが削減され、反応プロセス全体のエネルギー効率が向上する⁷⁾。例えば、熱分解およびガス化は、バイオマス原料を価値のある燃料に変換する有望な熱化学変換プロセスである。熱分解は、バイオ炭、タール (またはバイオオイル)、および永久ガスの生成につながり、ガス化は主に合成ガスを生成する。ある研究では、セルロース綿や繊維、

麻、木材、混合繊維で構成されるパネルなど、5 種類のバイオマスペースの断熱材料の特性が調査された。この研究では、ガス、固体および液体生成物の特性が調査され、その潜在的な応用が提案されている。例えば、繊維質バイオ炭は、高い表面積 (375 m²/g) と多孔質構造 (66%) を持ち、吸着剤としての利用が推奨されている⁸⁾。

さらに、急速熱分解を利用した研究では、パルス通電加熱によって日本のスギ材を様々な温度で熱分解を行い、得られた分解生成物の組成および構造変化が特徴づけられている。この研究では、500°Cで得られたバイオ炭がアンモニアを吸着する機能を持ち、800°Cでの熱分解によりナフタレン、アセナフチレン、アントラセン、パイレンなどの芳香族炭化水素およびベンゼン、トルエン、スチレンなどの基礎化学品が生成されることが示された⁹⁾。このように、木質炭素はその特性を活かして、固体燃料としての利用や、吸着剤としての応用など、多様な用途に利用されている。

革新的な木質炭素の利用例として、宇宙機の表面保護が挙げられる。木炭は宇宙船や人工衛星の表面を保護するための研究が行われている。ここでは、素材としての木炭を木質炭素と呼ぶことにする。なぜ木質炭素が宇宙で有用なのか、その理由と利用方法について説明する¹⁰⁾。

宇宙空間は非常に過酷な環境である。高い放射線、極端な温度変化、そして酸素がほとんどない真空状態が存在する。こうした環境で宇宙船や人工衛星を守るためには、特別な材料が必要である。木質炭素はその特性からこの役割に適している。まず、木質炭素は非常に軽くて強い。このため、宇宙船や人工衛星の重量を増やすことなく、しっかりと保護することができる。さらに、木質炭素はその黒色により熱をよく吸収し、高い熱放射率を持つため、効率的に熱を放出する能力がある。これにより、宇宙機の温度を安定させ、極端な温度変化から守ることができる。

宇宙空間では、材料が帯電することや真空中でガスが放出されることが問題となる。しかし、炭化した木材、すなわち木質炭素はこれらの問題を解決する。炭化することで、木材は電気を通し、ガスを放出しなくなるからである。また、宇宙空間には「原子酸素 (AO)」という材料を劣化させる要因がある。AO は、低軌道で飛行する宇宙船や人工衛星に影響を与え、材料を侵食する。しかし、木質炭素はこの AO に対しても耐性がある。研究によると、広葉樹材から作られた木質炭素は、AO に対して特に強い耐性を持つことが分かっている。一方、針葉樹材から作られた木質炭素は、AO に対してやや弱い耐性を示す。これは、広葉樹材に含まれる酸素が豊富な構造が AO に対して強い抵抗力を持つためである。

このように、木質炭素はその特性を活かして、宇宙機の表面を保護するのに適している。現在、宇宙船や人工衛星の表面保護材として、木質炭素の利用が進められている。これにより、宇宙機が長期間にわたって過酷な宇宙環境に耐えられるようになる。木質炭素の応用は、今後もさらに研究が進められ、より多くの宇宙機に採用されることが期待されている。これにより、宇宙探査や通信衛星など、私たちの生活に密接に関わる技術がさらに進化するだろう。木質炭素はその多機能性により、様々な分野での応用が期待されている。

5. 木質炭素の環境と持続可能性への貢献

木質炭素はその炭素固定能力により地球温暖化の緩和に寄与する。カーボンニュートラルなプロセスであり、樹木の成長過程で CO₂ を吸収し光合成を行い、形成された細胞壁に蓄積された炭素を固定化することにより、空気中の CO₂ 濃度を減らすことができる。また、木質炭素は持続可能な資源であり、森林保全や廃棄物の有効利用にもつながる。

木質炭素の製造方法は環境負荷が少なく、エネルギー効率の向上や廃棄物のリサイクルが推進されている。これにより、環境保護と経済発展を両立させることが可能である。木質炭素の製造・利用は持続可能な社会の実現に貢献する重要な技術である。

6. 木質炭素技術の進展と未来展望

最新の研究により、木質炭素の性能向上や新しい用途が開発されている。例えば、ナノテクノロジーを利用した木質炭素の改質技術が進められており、吸着能力や機械的強度が向上している。また、新しい製造方法の開発により、木質炭素の生産コストが削減されることが期待されている。

今後の技術革新により、木質炭素の機能性がさらに向上し、多様な分野での応用が進むことが期待されている。特に、エネルギー貯蔵や先進的なフィルター技術への応用が注目されている。木質炭素の多機能性を最大限に活用することで、持続可能な未来の実現が目指されている。

また、木質炭素技術の進展により、新しい市場やビジネスモデルが創出されることが期待されている。特に、環境保護や資源循環に関する新しいビジネスチャンスが増加しており、木質炭素技術は持続可能な経済発展の原動力となる可能性がある。

7. おわりに

木質炭素の性能向上や新しい用途が開発されており、特にナノテクノロジーを利用した改質技術が進んでいる。これにより、吸着能力や機械的強度が向上している。また、新しい製造方法の開発により、木質炭素の生産コストが削減されることが期待されている。

技術革新により、木質炭素の機能性がさらに向上し、多様な分野での応用が進むことが期待されている。エネルギー貯蔵や先進的なフィルター技術への応用が注目されており、木質炭素の多機能性を最大限に活用することで、持続可能な未来の実現が目指されている。

木質炭素技術の進展により、新しい市場やビジネスモデルが創出されることが期待されている。特に、環境保護や資源循環に関する新たなビジネスチャンスが増加しており、木質炭素技術は持続可能な経済発展の原動力となる可能性がある。科学的根拠と多くの人々の理解に基づいて木質炭素の有効活用を進めることが重要である。木質炭素は私たちの生活と環境をより良くするための鍵となる素材である。

参考文献

- 1) 立本英機監修、炭活用研究会編著。トコトンやさしい炭の本; 日刊工業新聞社, 2002.
- 2) Ishimaru, K.; Hata, T.; Bronsveld, P.; Meier, D.; Imamura, Y.: Spectroscopic analysis of carbonization behavior of wood, cellulose and lignin. *Journal of Materials Science* 2007, 42(1), 122-129. DOI: 10.1007/s10853-006-1042-3
- 3) IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (accessed 2024-07-23).
- 4) 農林水産省Webサイト. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/mokutan/syurui.html> (accessed 2024-07-23).
- 5) Keshvardoostchokami, M.; Keshvardoostchokami, M.; Braghiroli, F. L.; Koubaa, A. Advances in Modified Wood-Based Adsorbents for Contaminant Removal: Valorization Methods, Modification Mechanisms, and Environmental Applications. *Current forestry reports* 2023, 9 (6), 444-460. DOI: 10.1007/s40725-023-00200-6.
- 6) Lehmann, J.; Silva, J. P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 2003, 249. DOI: 10.1023/A:1022833116184.
- 7) Yuan, X.; Cao, Y.; Li, J.; Patel, A.K.; Dong, C. D.; Jin, X.; Gu, C.; Yip, A. C. K.; Tsang, D. C. W.; Ok, Y. S.: Recent advancements and challenges in emerging applications of biochar-based catalysts, *Biotechnology advances* 2023 67, DOI: 10.1016/j.biotechadv.2023.1081818)
- 8) Rabbat, C.; Awad, S.; Villot, A.; Andres, Y. Towards the Production of High Added-Value Products from the Pyrolysis and Steam Pyro-Gasification of Five Biomass-Based Building Insulation Materials at End-of-Life. *Waste and Biomass Valorization* 2023, 14 (6), 2061-2083. DOI: 10.1007/s12649-022-01989-2.

- 9) Honma, S.; Hata, T.; Ohashi, Y.; Sulisty, J.; Watanabe, T.; Yoshimura, T. Simultaneous production of aromatic chemicals and ammonia adsorbent by pulse-current pyrolysis of woody biomass. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2016, n/a-n/a. DOI: 10.1002/jctb.5027.
- 10) Hata, T.; Honma, S.; Kajimoto, T.; Oshida, K.; Tobimatsu, Y.; Tagawa, M.; Kojima, H.; Subyakto. Microstructural Changes in Carbonized Wood-Lignin under Atomic Oxygen Irradiation as a Potential Space Material. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2023. DOI: 10.1007/s13399-023-04957-5

著者プロフィール



畑 俊充 (Toshimitsu Hata)

<略歴> 1985 年、京都大学農学部林産工学科卒業。1987 年、京都大学農学研究科修士課程修了。同年、農林水産省林業試験場木材利用部研究員。1992 年、京都大学木質科学研究所木質材料機能部門助手。1993 年、京都大学より博士（農学）を取得。1995 年、文部科学省長期在外研究員としてノルウェー国木材工学研究所およびオランダ国立フローニンゲン大学に滞在。2004 年、京都大学生存圏研究所講師に就任し、現在に至る。<研究テーマ>環境保全と調和した持続可能な社会の基盤となる先進的炭素材料の研究。<趣味>ピラティスと健康のための速歩を实践。