

Powder-Based Approaches to Sustainable Development: Plant Material (Lignin) Valorization Strategies

Yoshiyuki INOUE¹

Lignin, an abundant aromatic biopolymer, is primarily generated as a by-product from industrial processes such as kraft pulping and lignocellulosic bioethanol production. Traditionally, lignin has been utilized as a combustion fuel for process heat recovery; however, this approach contributes to CO₂ emissions and offers limited value in the context of a carbon-neutral economy. With growing societal and industrial interest in sustainable materials and the reduction of greenhouse gas emissions, lignin is increasingly recognized as a promising renewable feedstock for a variety of high-value applications, including energy storage, construction materials, cosmetics, and polymer composites.

To effectively utilize lignin in such applications, it is essential to precisely control its physicochemical characteristics, particularly particle size and morphology, which directly influence dispersion, reactivity, and processability. Due to lignin's complex, variable structure and flammability, advanced powder processing technologies are required to ensure both functional performance and operational safety.

This paper introduces a comprehensive approach to lignin powder processing, focusing on two core technologies: fine grinding and dry granulation. For the fine grinding of lignin to particle sizes suitable for applications such as films or fillers in thermoplastic composites—typically requiring a d_{97} below 10 µm—jet milling systems are employed to ensure high-precision production of ultrafine particles with a narrow particle size distribution. In particular, the fluidized bed opposed jet mill (AFG) developed by Hosokawa Alpine has been demonstrated as an effective technology for achieving the desired specifications.

For coarser applications (e.g., $d_{97} \approx 20\text{--}30$ µm), impact classifier mills such as the ACM Pulverizer® offer an energy-efficient alternative. Experimental data presented in this study demonstrate how particle size and energy consumption are interrelated and highlight the importance of process selection based on target application.

Additionally, to address challenges related to handling, dusting, and bulk density, dry agglomeration using roll compactors has been implemented. This technique produces dust-free, free-flowing granules or briquettes that facilitate storage, transport, and downstream processing.

The integration of powder technologies enables the functional conversion of lignin into industrially viable forms, thereby supporting its transition from a waste stream to a valuable resource. This work emphasizes the role of particle engineering in realizing lignin's potential as a key material in a circular, low-carbon economy.

Keywords:

Lignin
Biomass resource
Fine grinding
Dry granulation
Carbon neutrality



¹Section Manager, Corporate Management Division, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

サステナブル社会に貢献する粉体技術： 植物性原料（リグニン）の活用

井上 義之

ホソカワミクロン株式会社 経営管理本部 経営企画部 課長

抄 錄

リグニンは、パルプやバイオエタノール製造過程で副生されるバイオマス資源であり、従来は主に熱源として利用されてきたが、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、機能性材料としての活用が期待されている。応用には粒子径制御やハンドリング技術が不可欠であり、微粉碎や乾式造粒といった粉体プロセスが重要な役割を果たす。ジェットミルやACMパルペライザ[®]による粉碎技術により、エネルギー効率を考慮しつつ、目的に応じたリグニン粉体を得ることができる。また、造粒機ARC-MSによる乾式造粒技術により、流動性・保管性・安全性に優れたりグニン顆粒やブリケットの製造が可能である。本稿では、リグニンの有効利用に不可欠な粉体技術とその応用事例を紹介する。

1 はじめに

パルプは、木材や段ボールなどの繊維成形品を機械的または化学的に加工することで得られる素材であり、消費財、商業印刷、工業用包装材など幅広い分野で利用されている。こうした用途の広がりにより、パルプの世界市場における需要は安定して成長している。特に、飲食品、eコマースなどの包装材料分野においては、樹脂製品に対する規制の強化や環境負荷の低減が強く求められており、これに対応する形でパルプベース製品の需要が増加している。また、新型コロナウイルス感染症の流行を契機として、衛生意識の高まりから、ティッシュペーパーなどの紙製品の需要も増加傾向にある。

こうした背景のもと、TechSci Research の報告^[1]によれば、パルプの世界市場は2024年に1,555億1,580万米ドルと評価され、2030年には2,204億3,510万米ドルに達すると予測されている。2025年から2030年にかけての年平均成長率（CAGR）は4.81%と見込まれている。

パルプの製造にはさまざまな方法があるが、一般

的には原料である木材チップを苛性ソーダで煮沸し、木材中の纖維を抽出・漂白するクラフト法が広く用いられている。木材は主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成されており（図1）、このうちリグニンは植物の構造強化や水分輸送を担う維管束の形成に関与している。パルプはセルロースを主成分とするが、木材の重量の約2~3割はリグニンであるため、クラフト法によるパルプ製造に

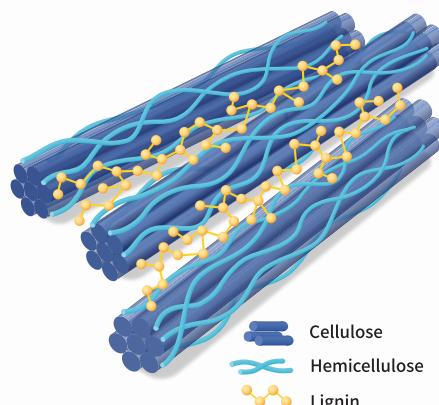


図1 植物の纖維構造の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of plant fibre structure.

伴って大量のクラフトリグニンが副生する。多くの場合、このリグニンは工場内の熱源として燃焼利用されるが、CO₂の排出が避けられず、GHG（温室効果ガス）削減の観点からは課題が残る。そのため、近年ではリグニンの燃料利用に代わる新たな活用法が模索されている。

一方、近年注目されているバイオエタノールは、発酵によって糖をアルコールに変換するプロセスで生産されるが、原料に含まれるリグニンは糖化を妨げる成分として除去されるため、バイオエタノールの生産量が増えるに伴ってリグニンの副生量も増加する。

これらのリグニンは熱エネルギー源として利用することが可能であるものの、やはりCO₂排出の課題が残る。そこで注目されているのが、リグニンを素材として有効活用することでカーボンニュートラル社会の実現に寄与するアプローチである。たとえば、日本製紙・フローリック・大林組の共同研究により、コンクリートにリグニン粉末を添加することでCO₂を固定化し、製造時のGHG排出を低減できることが報告されている^[2]。また、リグニンは紫外線吸収能や抗酸化活性に優れしており、化粧品への応用も期待されている^[3]。さらに、リグニンを炭化することで得られる炭素材は、リチウムイオンやナトリウムイオン電池の負極材としても優れた性能を有している^[4]。

他にも、リグニンは動物飼料、化学工業用ビルディングブロック、タイヤ用の新規ゴム素材、発泡体（ポリウレタンフォーム、エアロゲル）など、さまざまな用途で化石資源の代替材料として活用でき、CO₂削減に貢献し得る。

リグニンはクラフトパルプやバイオエタノールの製造過程で固体物として回収され、炭化処理によって得られる炭化リグニンも同様に固体形態で得られる。これらを原料として実用的な製品に変換するには、多くの物理的処理が必要であり、中でも粉体プロセスが重要な役割を果たす。

具体的には、リグニンを他素材と混合するために微粉碎する工程、粉碎物を圧縮してハンドリング性を向上するための造粒工程、あるいは乾燥や混合、輸送などの操作が求められる。当社グループ企業であるホソカワアルピネでは、こうしたリグニン処理に対して自社と欧州のグループ会社の技術・製品を

結集し、多様な粉体処理技術を提供している。

本稿では、リグニンの微粉碎と乾式造粒技術について紹介する。なお、乾式造粒システムは2025年にスウェーデン・モンステロース市に工場を持つSödra社に採用され^[5]、粉体技術が持続可能な社会に貢献する一例となっている。

2 リグニンの加工に用いられる粉体プロセス

2.1 リグニン粉体に求められる特性と、それを実現する粉体プロセスの概要

リグニンの分子構造は天然由来で極めて複雑であり、さらに樹種や部位によってその組成・構造が異なるため、物性も多様である。このため、標準化された加工プロセスの確立が難しく、原料特性および目的とする最終製品の要件を踏まえた生産システムの構築が不可欠である。さらにリグニンの性能は粒子特性、特に粒子径に強く依存するため、粉碎は極めて重要な技術である。重要な指標として、累積粒子径分布において97%に相当する粒子径(d_{97})や粒子径分布のプロファイルが挙げられる。用途ごとに要求される粒子径が異なるため、適切な粒子径制御が不可欠である。たとえば、機能性フィルムのフィラーとして使用する場合には、 d_{97} が10 μm未満の微粒子が必要である。粒子径が大きいと、フィルム中に粒子が粒状に見えてしまうためである。また熱可塑性プラスチックへの添加用途では、押出成形に必要となる流動性などの特性を維持するために、20～30 μmの平均粒子径が求められる。さらにリグニンを液体中に分散させて用いる場合には、沈殿しにくい懸濁液を得るために $d_{97}<1$ μmの超微粒子が必要である。

このような微粉碎リグニンは、空中に浮遊した状態では粉塵爆発の危険があり、また粉体としては流動性が低く、かさ密度が小さいなど、取り扱い上の課題が多い。そのため、乾式造粒装置によって、発塵がなく、流動性と作業性に優れた顆粒またはブリケット化することが求められる。

表1に示すように、近年注目されている3種類のリグニン原料に対しても、適切な粉体プロセスの選定が必要である。クラフトリグニンは通常微細な粒子で構成されており、気相中では凝集して200～300 μm程度になるが、一次粒子径は小さく、一般

表1 異なるリグニン原料に対して要求される粉体処理装置

Table 1 Powder processing equipment required for different lignin raw materials.

	超微粉碎用 ジェットミル	分級機内蔵 衝撃式粉碎機	分級機	圧縮造粒機
パルプから作られるクラフト リグニン	—	—	—	○
バイオエタノール製造工程で 作られるリグニン	○	○	○	○
炭化リグニン	○	—	○	—

的に粉碎は不要である。ただし、粉塵爆発や保管性などの観点から造粒が有効である。一方、バイオエタノール製造過程で除去されるリグニンや、炭化リグニンは粒子径が大きく、不均一なため、粉碎や分級などの粉体処理が必要とされる。

2.2 微粉碎技術によるリグニン粒子径制御

リグニンの加工において、まず必要となるのが粉碎処理である。現在、世界中では多様な粉碎機が市販されており、原料の性状や目的とする粒子径およびその分布に応じて、適切な粉碎装置を選定することが重要である。特に、工業規模で粉碎を行う際には、得られる粒子径によって処理能力が大きく変化する点が留意すべき事項となる。さらに、長時間の連続運転に伴う装置内壁への原料の付着や部品の摩耗も、粉碎効率や安定稼働に影響を与える。加えて、リグニンは可燃性物質であり、微粉碎により比表面積が増加すると、粉塵爆発の危険性が高まる。そのため、防爆対策が不可欠である。こうした要求を満たす粉碎装置として、当社では乾式ジェットミルおよび分級機内蔵衝撃式粉碎機を提供している。

ジェットミルは、 $d_{97}=5\sim15\text{ }\mu\text{m}$ のリグニン粒子を工業生産レベルで得るための装置である。具体例として、ホソカワアルピネ製の流動層式対向型ジェットミル「カウンタジェット®ミル AFG」が挙げられる。本装置は、図2に示すように装置下部に対向するノズルを備えた粉碎部と、上部に設置されている分級部から構成される。機内に供給された原料は、対向ノズルから噴出する高速気流により流動状態を形成し、粒子間の相互衝突によって微細化される。粉碎後の粒子は気流に乗って上昇し、分級ロータによって目的とする大きさの粒子のみを機外に回収する。粗粉は再度粉碎室へと戻され、再粉碎される。

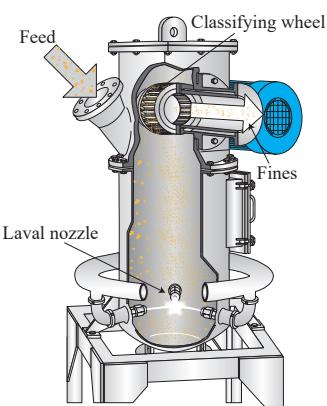


図2 カウンタジェットミル AFG® 内のフローパターン
Fig. 2 Flow pattern in fluidized bed opposed jet mill AFG.

一方、より粗い粒子の製造には、分級機を内蔵した機械式粉碎機「ホソカワマイクロ ACM パルベライザ®」が広く用いられている。原料はスクリューフィーダや空気輸送によって機内に導入され、高速回転する粉碎ロータにより効率的に粉碎される。その後、気流とともに分級部に送られ、遠心分級により微粉が製品として排出され、粗粉は再び粉碎部に戻って再粉碎される（図3）。

両装置とともに、不活性ガスを循環させるシステムとの組み合わせによる防爆対応実績が多数あり、可燃性微粒子を扱う上での安全性を確保している。

ジェットミルは、高速気流を生成するために大型コンプレッサが必要であり、消費エネルギーが大きい。一方で ACM は機械的な粉碎方式を採用しており、エネルギー効率に優れているが、一般にジェットミルの方がより微細な粒子が得られる。図4にリグニン粉碎品の粒子径分布を示す。ジェットミル (AFG) では $d_{50}=2.6\text{ }\mu\text{m}$, $d_{97}=10\text{ }\mu\text{m}$ の粒子が得られるのに対し、ACM では $d_{50}=10\text{ }\mu\text{m}$, $d_{97}=24\text{ }\mu\text{m}$ となっている。また、図5にはそれぞれの装置による d_{97}

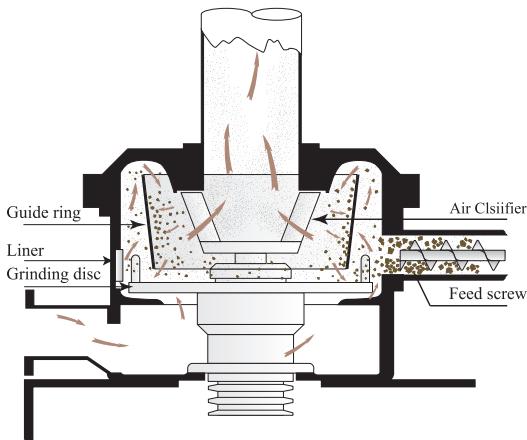
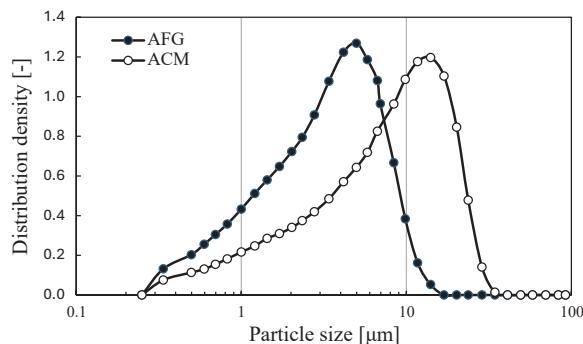
図 3 ACM パルペライザ[®] 内のフローパターンFig. 3 Flow pattern in ACM pulverizer[®].

図 4 AFG と ACM によるリグニンの粉碎例

Fig. 4 Examples of lignin powder milled by AFG and ACM.

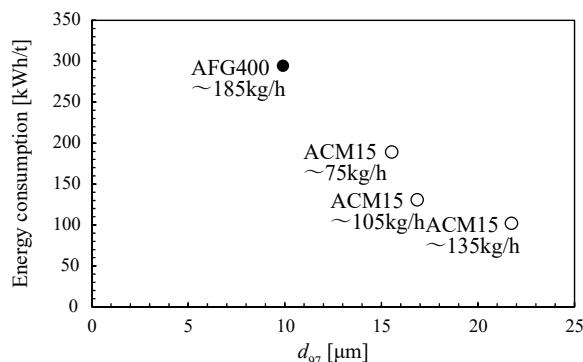


図 5 粉碎機による消費エネルギーの比較

Fig. 5 Comparison of energy consumption between milling machines.

と消費エネルギーの関係を示す。ここでは、 $1200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の圧縮空気を使用する 400AFG、および $1350 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の風量と約 11 kW のモータを備えた 15ACM を用いた。結果として、粒子径が小さくなるにつれて消費エネルギーが指数関数的に増大する



図 6 乾式圧縮造粒機 ARC-MS の外観

Fig. 6 Appearance of the ARC-MS dry compactor.

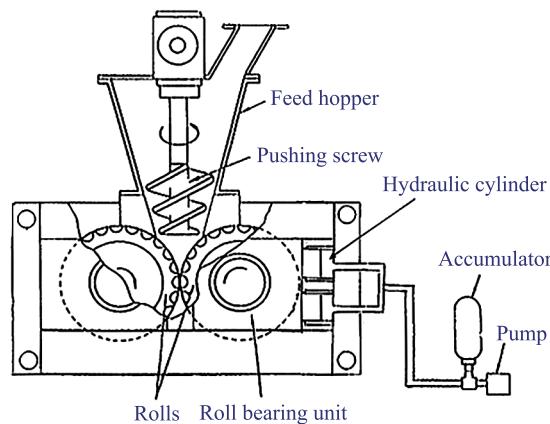


図 7 ARC-MS 造粒機の機構概略図

Fig. 7 Schematic diagram of the ARC-MS granulation mechanism.

傾向が示されており、数 μm の粒子径の差が運転コストに与える影響の大きさが示されている。

2.3 リグニン粉体の取り扱いに関する課題とその解決方法

前節で述べたように、微粉碎されたリグニンは、粉塵爆発の危険性に加え、かさ密度の低さや流動性の悪さから、取り扱いや保管が困難である。これらの問題に対しては、ブリケット化や顆粒化による造粒処理が有効な対策となる。

この造粒工程においては、処理能力に優れた連続式乾式圧縮造粒機の利用が一般的である。図 6 に、代表的な装置である乾式圧縮造粒機 ARC-MS、図 7 にその機構の概略を示す。供給ホッパから装置に投入された原料は、縦型スクリューによって脱気および予備圧縮されつつ、同一速度で逆回転する 2 本の



図 8 リグニン粉碎物の造粒品例

Fig. 8 Examples of granules and briquettes made from milled lignin.

ロールの間へと送り込まれ、圧縮成形される。ロールの凹凸形状や間隔を調整することで、成形品の形状や密度を制御できる。例えば、ポケット付きのロールを使用することで、ブリケット状の製品が得られる。一方、フラットなロールを使用すると板状に成形され、これを解碎することで顆粒製品が得られる。得られた顆粒のうち、希望の大きさより小さい粉末や破片はふるいによって分離・除去され、再び加圧工程に戻される。この工程により、流動性に優れ、発塵のない（ダストフリー）高品質なリグニン顆粒またはブリケットの製造が可能となる。

図 8 に、実際に製造された造粒製品の例を示す。本造粒技術により、リグニン粉体の取り扱い性は大幅に向上し、保管や輸送、下流工程への移送も容易となる。

3 おわりに

本稿では、持続可能な社会の実現に向けて注目されるリグニンの利活用と、それを支える粉体プロセス技術について解説した。従来、リグニンは廃棄または熱源としての利用に限られていたが、近年ではカーボンニュートラル材料としてのポテンシャルが評価され、化粧品や電池材料、建築資材など多岐にわたる応用が検討・実用化されている。

こうした高度な利用を実現するには、リグニンを安定的に取り扱い、所望の形状や機能を付与するた

めには、粉体技術が不可欠である。とりわけ、微粉砕および乾式造粒といったプロセスは、リグニンの機能性を最大限に引き出しつつ、製造現場における安全性や効率性を両立させる上で重要な役割を果たしている。

今後、リグニンをはじめとするバイオマス資源の高度利用は、循環型社会の構築や温室効果ガスの削減に向けた鍵となるであろう。当社はこれからも、粉体プロセス技術のさらなる高度化を通じて、環境負荷の低減と産業技術の進展に貢献していく所存である。

References

- [1] TechSci Research, Pulp Market - Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity, and Forecast, Segmented By Sales Channel (Direct, Indirect), By End Use (Tissue, Printing & Writing, Specialty, Fluff, Packaging, Others), By Region and Competition, 2020-2030F, <<https://www.techsciresearch.com/report/pulp-market/29552.html>> accessed 2025-07-30.
- [2] 平田 隆祥, 西澤 彩, 田中 寛人, 新杉 匠史, “脱炭素社会に向けたコンクリート技術の開発”, 大林組技術研究所報, 88 (2024) 1–10. <<https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/ronbun/ronbun.html>> accessed 2025-07-30.
- [3] Antunes F., Mota I.F., Fangueiro J.F., Lopes G., Pintado M., Costa P.S., From sugarcane to skin: lignin as a multifunctional ingredient for cosmetic application, International Journal of Biological Macromolecules, 234 (2023) 123592. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123592>
- [4] Matei Ghimbeu C., Zhang B., Martinez de Yuso A., Réty B., Tarascon J.-M., Valorizing low cost and renewable lignin as hard carbon for Na-ion batteries: Impact of lignin grade, Carbon, 153 (2019) 634–647. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.07.026>
- [5] Hosokawa Alpine Group, Hosokawa Alpine supplies lignin granulation plant to Södra in Sweden, 2025, <<https://www.hosokawa-alpine.com/company/news/detail/hosokawa-alpine-lignin-granulation-plant-for-soedra/>> accessed 2025-07-30.

著者紹介

井上 義之 Yoshiyuki INOUE



〔経歴〕 1992 年 信州大学大学院纖維学研究科纖維化学工学専攻修了、同年ホソカワミクロン入社。1994 年より大阪大学大学院博士後期課程工学研究科産業機械工学専攻入学（社内留学制度による）、2000 年 博士（工学）取得。2014 年から現職。

〔専門〕 粉体工学、特に数値シミュレーション技術

〔連絡先〕 yinoue@hmc.hosokawa.com