

リグニン—再生可能な原料の最適利用に貢献する粉体技術

ホソカワミクロン株式会社 井上 義之
HOSOKAWA ALPINE AG ソニア・ザイラー
Yoshiyuki INOUE
Sonja SEILER

Key Words: ジェットミル、衝撃式粉砕機、遠心力型分級機、圧縮造粒

1. はじめに

木質はおもにセルロースとヘミセルロース、そしてリグニンから構成されている（図-1）。リグニンはセルロースの接着剤のような働きをしている。また木材重量の2割から3割を占める芳香族化合物の1種である。リグニンは細胞壁に蓄積し、それによって植物が木化するため、日本語では木質素とも表記される。植物進化の過程でリグニンが登場したことによって植物は地上で繁栄した。また当時はリグニンを分解できる生物がいなかったために、枯れた植物は分解されず長い年月を経て石炭となった。このように過去のリグニンは、世界の工業化に重要な役割を果たしてきた素材であるが、最近までは多くの場合パルプやバイオエタノールの製造過程で生じる、あまり役に立たない副産物と見なされていた。このためほとんどの場合、リグニンは主に熱源として活用されるだけで

あった。

しかし近年、カーボンニュートラルを実現するための手法の一つとして、リグニンの活用が注目されている。例えばコンクリートは製造工程で多量のCO₂が発生してしまうが、日本製紙・フローリック・大林組によって、コンクリートにリグニン粉末を混ぜることによってCO₂を固定化し、カーボンニュートラルを図れることが報告されている¹⁾。またリグニンは紫外線を吸収する可能性と特徴的な抗酸化活性により、化粧品への応用が期待されている²⁾。さらにリグニンは石油に変わるプラスチックの材料としても注目されている。他にもリチウムイオン電池の負極材として使われるハードカーボン、動物飼料、化学工業用ビルディングブロック（有機化合物の合成において小規模の分子を比較的単純な反応を用いながら、より大きな分子に変換していく場合に使用する小規模分子）、タイヤ用新規ゴム材料の原料、カーボンブラックの代替品、発泡体（ポリウレタンフォーム、エアロゲル）や、化粧品の添加剤など、化石原料や有害な原料の代替品として役立てることが可能である。これらを作るためには原料となるリグニンを微粉砕して、他の材料と混合する、あるいは製造工程のハンドリング性向上のために微粉を圧縮造粒する工程が必要である。また粉砕の前工程に乾燥が必要なケースや、ロット調整をはじめとした粉体混合、あるいは単位操作間でリグニン粒子を輸送するためのハンドリングプロセスなど、リグニンの製造には多くの粉体技術が必要になる。当社のグループ企業であるホソカワアルピネ AG では、リグニン処理に対してさまざまな粉体処理技術を顧

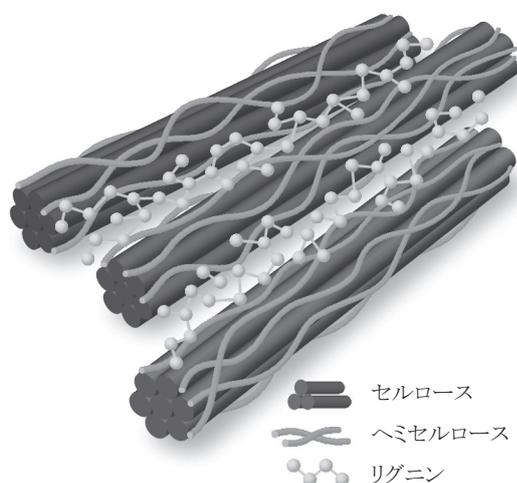


図-1 木質の構成要素

客に提供している。本文ではその中で、微粉碎と造粒技術について紹介する。

2. リグニンの加工に使われる粉体プロセス

他の天然原料と同様に、リグニンの原料となる材料も物性が変動しやすく、製造プロセスの制御が難しくなるという問題がある。またリグニンを作り出す、あるいは作り出される工程にはさまざまな方法があり、リグニンの特性も変化する。このためリグニンを粉碎する標準的な方法は存在せず、用途と要件を深く理解した粉碎システムの提案が必要になる。例えばリグニンの性能はその粒子特性に大きく依存する。ここで非常に重要になる物性として累積97%粒子径になる d_{97} がある。これは最終用途によって要求される粒子径が異なるためである。例えばフィルム用の機能性フィラーとして利用する場合は d_{97} がおよそ $10\ \mu\text{m}$ 未満の粒子が必要とされる。これは粒子が大きすぎるとフィルムの中に粒子が見えてしまうためである。その他、熱可塑性プラスチックにフィラーとして混ぜる場合、押出成形に適したマトリックスを得るために必要な平均粒子径は $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度である。さらに、リグニンナノ粒子を懸濁液として使う場合、液を安定化させるために $d_{97} < 1\ \mu\text{m}$ の粒子が必要である。さまざまなリグニン原料を微粉碎した結果を写真-1に示す。色や一次粒子の凝集性が異なっている様子がわかる。



写真-1 リグニンの粉碎品

このように微粉碎されたリグニン粒子は用途に応じて、顆粒やブリケットとして加工することによって良好な流動性を持ち、発じんがなく、作業性に優れた形態にすることができる。さらに原料となるリグニンは前記に述べた以外に、水熱炭化により処理された炭化リグニンも挙げられ、必要とされる粉体プロセスが異なる(表-1)。

2-1 リグニンの粉碎技術

多様な粉碎機構を持つ粉碎機が販売されているが、原料や必要な製品粒子径およびその分布に応じて使い分ける。工業生産レベルで粉碎を実施するための重要なポイントとして、粒子径に応じて処理能力が大きく変化することが挙げられる。これには数時間以上の運転による付着や磨耗も影響する。このため粉碎機の選定には、これらのパラメーターを考慮する必要がある。さらにリグニンは可燃性であるため、微粉碎により比表面積が増大して粉じん爆発を起こす可能性が生じるため、各種の防爆対策が必要となる。このような条件を満たす粉碎機として、当社では乾式粉碎機であるジェットミルと分級機内蔵衝撃式粉碎機を提供している。

$d_{97} = 5\sim 15\ \mu\text{m}$ のリグニン粒子を工業生産レベルで得るための粉碎機として、ジェットミルが適している。例えば流動層式対向型のホソカワ/アルピネ カウンタジェットミル®AFG(写真-2)が使われている。AFGは対向するノズルを有する粉碎部と分級部で構成されている(図-2)。機内に投入された原料が、対向するノズルから噴出する高速ジェット気流により粉碎室内に流動状態を形成し、かつ粒子は加速されて相互衝突が繰り返され、粉碎される。なお図ではノズルを見せるために希薄層として表現されているが、実際には高濃度の流動層になっている。粉碎された粒子は気流と共に上昇し、上部の分級ローターにおいて遠心力と、機外に吸い込まれる力とのバランスを制御することによって必要とする大きさの粒子を機外に取り

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

	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	○	-	○	-

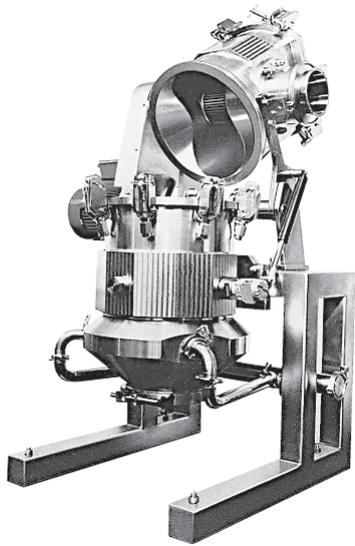


写真-2 カウンタジェットミル®AFG



写真-3 マイクロバースト AMB

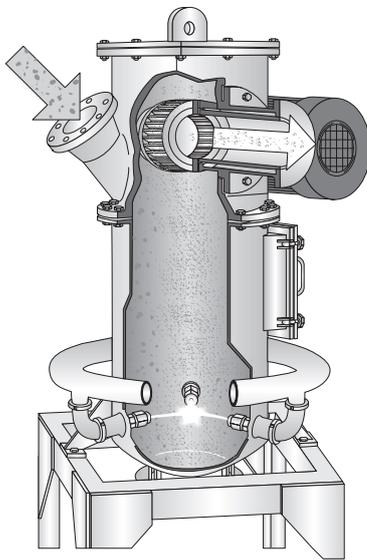


図-2 AFGの内部構造

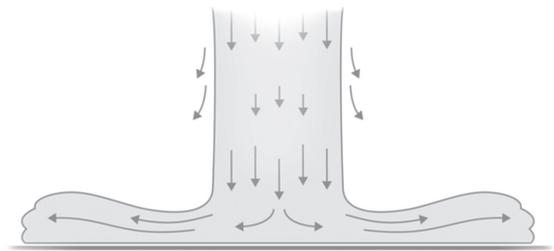


図-3 AMBの内部流れ

出す。粗粉は粉碎室に落下し、再粉碎される。

さらに実験機として、スパイラルジェットミルの一種であるホソカワ/アルピネ マイクロバースト AMB (写真-3) も使われている。旋回流により粒子を粉碎するスパイラルジェットミルの一種であり、気象現象のひとつであるダウンバーストにちなんで名付けられた。なおダウンバーストとは積乱雲から下に向かって強風が吹き下ろす現象である。強風は地面にぶつかって水平に広がる。このフローパターンに類似した流れを機内で発生させることによって (図-3) 壁面に原料を高速で衝突させて粉碎する。AMB では投入口が大きく、かつ前述のフローパターンによる効率的な粉碎を可能としたため、粗粉碎された原料や繊維質原料を超微粉碎することができる。

一方、ホソカワ/マイクロ ACM パルベライザ® (写真-4) は機械式粉碎機的一种であり、図-4に

示すような構造をしている。分級機が内蔵されており、その回転速度を制御することで粒子径の異なる製品を作ることができる。スクリーフィーダーなどで機内に送り込まれた原料は、粉碎ローターで効率的に粉碎される。その後、循環気流に乗って分級部へ送られた粒子は分級作用を受け、微粉は分級ローター内側へ吸引されて製品として排出される。また粗い粒子は遠心力によって弾き飛ばされて粉碎部へ戻り、粉碎ローターの外周部に取り付けられたハンマーとライナによる強い衝撃作用で再粉碎される。分級された微粉は気流に乗ってサイクロンや集じん機で製品として回収される。ジェットミルでは高速気流を作り出すために大型のコンプレッサーが必要であり、消費エネルギーが大きいという問題があるが、ACM パルベライザは機械式粉碎機であるためジェットミルよりもエネルギー消費が少ない。また爆発防止あるいは品質保持などを目的とした不活性ガス循環システムフローの納入実績も多い。後述の通り、この対策はリグニンの微粉碎システムには必須である。なお内蔵されている分級機の性能限界によって製品粒子径はジェットミルより大きくなるが、 d_{97} が $20\ \mu\text{m}$ の粒子を製造する場合、消費エネルギーやイニシャルコストがジェットミルより小さい



写真-4 ACM パルベライザ®

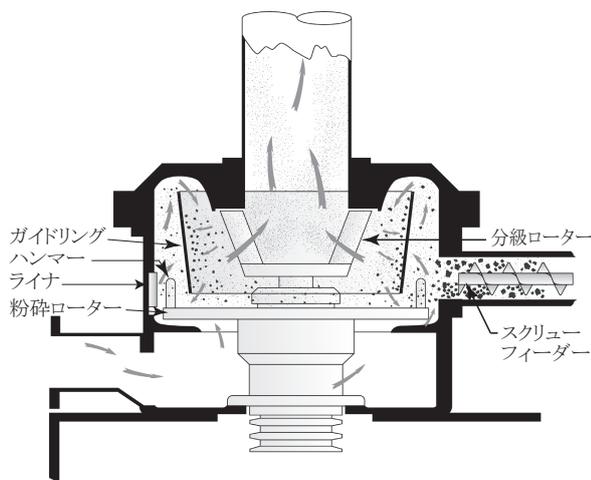


図-4 ACM パルベライザ®の構造

め広く用いられている。

それぞれの粉砕機で得られた粉砕品をレーザー解析散乱で測定した粒子径分布を図-5に示す。最小粒子径は両者とも同じような値を示しているが、流動層式対向型ジェットミル AFG では $d_{50} = 2.6 \mu\text{m}$ 、 $d_{97} = 10 \mu\text{m}$ 、ACM では $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ 、 $d_{97} = 24 \mu\text{m}$ となっており、先述の通り AFG の方が微細な粒子が得られている。AFG では大きな粒子を流動層内に戻して再粉砕する能力が ACM より高く、最大径が抑えられていることがわかる。また図-6に

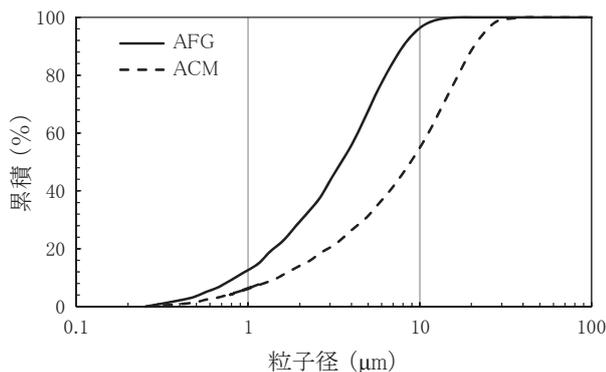


図-5 AFG と ACM によるリグニンの粉砕例

AFG と ACM によってリグニンを粉砕したときの d_{97} と消費エネルギーの関係を示す。ここでは $1200 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ の粉砕空気量を使用する 400AFG または $1350 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}$ の風量および約 11 kW の粉砕用モーターを使用する ACM15 を用いた。なお風量は標準状態で換算している。粒子径が減少するにつれて消費エネルギーが増大する様子が示されており、わずか数マイクロメートルの差でもランニングコストに与える影響が大きく、適切な粒子径の設定が非常に重要であることが示されている。

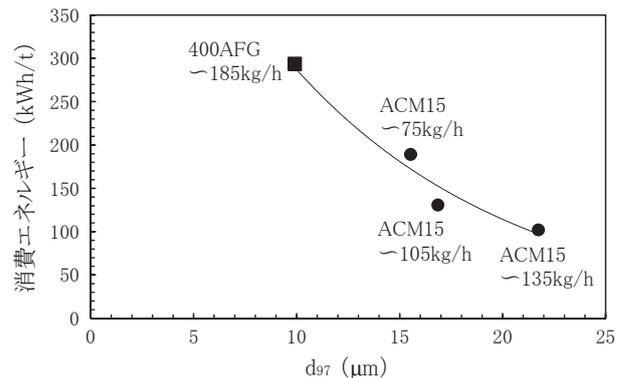


図-6 AFG と ACM による消費エネルギー

なお、より狭い粒子径分布の製品を得るためには $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の微粒子を粉砕品から除去する、あるいは $20 \sim 30 \mu\text{m}$ の粗粒子を除去することが必要である。これを実現するために、当社では遠心力型分級機 ATP を提供している。

2-2 顆粒と粉末

リグニン微粒子は空中に浮遊している場合に粉じん爆発性を持つ。一方で粉体層として存在している場合は流動性が悪く、また高密度が低い。このため粉砕粒子の取り扱いが複雑で、労働安全衛生にはコストがかかり、保管には広い倉庫が必要になるという課題がある。こうした課題を解決するのが、リグニン粉のブリケット化や顆粒化である。そのために処理能力が高い連続式圧縮造粒機が使われる。写真-5にこの用途で使われる造粒機 ARC MS を、図-7に造粒機構の概略を示す。この造粒機は回転する2個のロールにより高圧で粉体を圧縮成形する。ロール表面の凹凸形状やその間隔の調整により、成形品の形状などが変化する。例えば写真-6に示したポケット付きロールを使うとブリケットを作ることができる。一方、ポケットがないタイプを使うと板状に成形されるため、これを解砕し、顆粒状の製品を得ることができる。なお希望するサイズよりも小さな顆粒や破片あるい

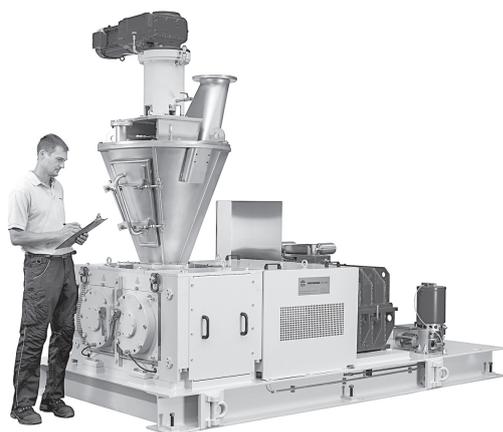


写真-5 造粒機 ARC MS

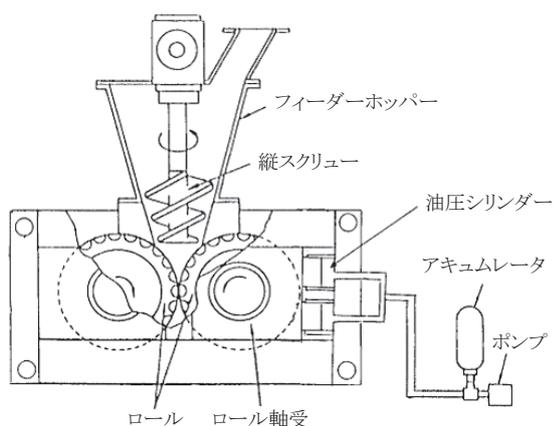


図-7 造粒機構

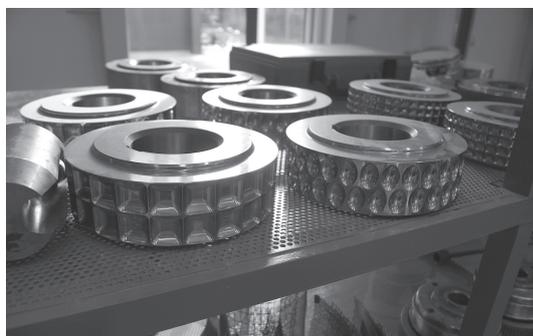


写真-6 ポケット付きロール

は粉じんはふるい分けによって製品から除去され、再び加圧工程に戻される。この工程によって、高い製品品質、嵩密度の増加、良好な流動性を備えたダストフリーのリグニン顆粒またはブリケットの製造が可能である。写真-7の左にブリケットの例（大きな塊）を、右側に顆粒の例を示す。



写真-7 リグニン粉砕物のブリケット顆粒

3. おわりに：リグニンのさらなる利用を目指して

ホソカワアルピネでは、天然原料であるリグニンの工業利用をさらに展開するため、ハンブルクを拠点とする新興企業リグノピュア社 (Lignopure GmbH) と協力している。両社はリグニン市場向けにカスタマイズされたプロセスを開発し、原料の品質と市場の可能性に基づいた個別のソリューションを提供することを目指している。先述の通り、リグニンはその製法や原料によって加工性が変化することが知られている。また要求される粒子径も最終製品に依存する。このためリグノピュア社は原料と潜在的な最終用途の二つを分析し、必要な粒子特性を調査している。我々は、それらの粒子特性を持つ粉体を、必要な処理能力で加工できる装置として、本文で紹介した粉碎機や造粒機、それらの上流と下流の工程を含めたプロセスを提供し、リグニンの活用による循環型社会への貢献を目指している。

参考文献

- 1) 木質バイオマスを使用した脱炭素化に貢献するコンクリート「リグニクリート™」を開発、https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220510_2.html
- 2) Filipa Antunes, Inês F. Mota, Joana F. Fangueiro, Graciliana Lopes, Manuela Pintado, Patrícia Santos Costa, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123592>



いのうえ よしゆき
井上 義之
ホソカワミクロン(株)
経営戦略本部 経営企画部 経営企画課
課長

〒573-1132 大阪府枚方市招提田近1-9
TEL: 072-855-2704
E-mail: YINOUE@hmc.hosokawa.com



ソニア・ザイラー
Head of Sales, Chemical Division,
HOSOKAWA ALPINE AG

86199
Peter-Doerfler-Str. 13-25, Augsburg, Germany
TEL: +49 821 5906-0