

# 「タンデムロールクラッシャー」について

杉山 大介<sup>\*</sup>

## 1. タンデムロールクラッシャー開発の背景

粉砕は，固体に力を加えて粒子の細分化や比表面積の増加を行う操作であり，産業界では，化学反応速度の向上や物性の改善を目的として様々な手法で粉砕が行われている。外力による粉砕は，**図1**のように圧縮，打撃，剪断・磨砕，反撥に大別される。粉砕物の用途目的によって適切な粉砕原理の選択は異なる。

産業革命以降，広く使用されている粉砕機にロールクラッシャーがある。ロールクラッシャーはその名の通り，2本の回転するロール間に原料を通しロールの圧縮力で細分化を促進させる装置である。シンプルな構造で，連続的に粉砕処理が可能な特徴を持つが，その構造に起因する特有の問題がある。

### (1) 投入サイズ

ロールクラッシャーへ投入する原料塊にはサイズ制約がある。大きな原料塊を投入した場合，塊は2本のロール上で転がり続けてロール間に噛み込まず粉砕が促進しない。これは，原料とロール表面の摩擦力  $R$  よりもロール圧力  $P$  の鉛直成分が勝るためである（**図2**参照）。この解決策は，ロール径を大きくし噛み込み角を小さくすることである。ロール径とロール間隙の関係は**式1**で示される。通常は，原料塊のサイズをロール径に合致するよう粗砕し，投入を行うこととなる。

### (2) 付着

2本のロール間を通過する原料は，ロール間の圧力を受けて粉砕されるが，同時にロール表面では粉砕時の反力を受ける。そのため，原料の物性によっては，粉砕に伴って付着が発生し，付着面でさらに新たな原料が粉砕されることで，フレーク状の付着が成長する。成長したフレーク異材はロールから剥離し，粉砕品の歩留まりを低下させる要因となる（**写真1**は粉砕品に混入したフレーク異材）。

また，多量の原料がローラーへ喰い込んだ時は，左右のローラーから圧縮力を受け，やはりフレークを生成してしまう。

ロールクラッシャー固有の欠点は2本のロールが等速で対称回転することに起因する。一般的なロールクラッシャーは，2本のロールのシャフト端面に駆動ギヤを配置し，連結させて1台のモーターで駆動する。そのため，速度調整や回転方向が制約され

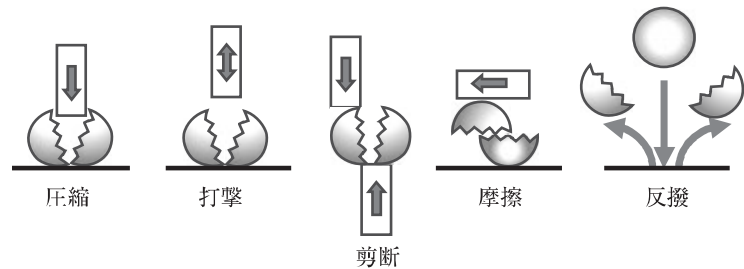


図1 外力による粉砕

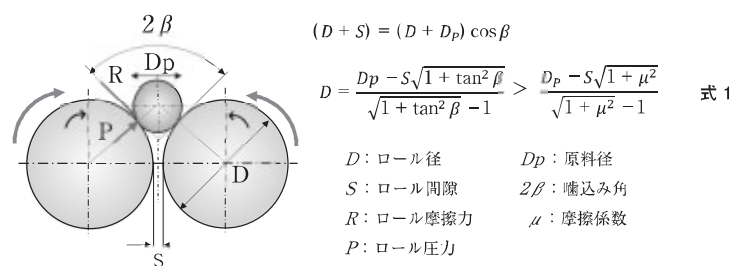


図2 ロール噛み込み条件

<sup>\*</sup> SUGIYAMA Daisuke：杉山重工株式会社 代表取締役

<sup>\*</sup> 本社・工場

〒489-0003 愛知県瀬戸市穴田町 970-2

TEL：0561-48-1811(代表)

FAX：0561-43-0477

<https://www.e-sugiyama.co.jp>



写真1 ロール表面に発生した付着とフレック状剥離物



写真2 タンデムロールクラッシャー外観/駆動部

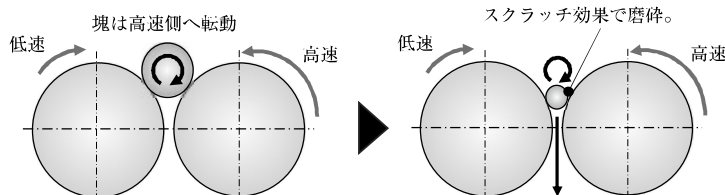


図3 差速による粉砕挙動

ル上で塊が回転を始める。この高速ロールに接する面でスクラッチ効果が発生し塊は徐々に小さくなり、最終的にロール間に噛み込まれ粉砕される(図3)。

ロールが等速の場合、ロール間に噛み込まれた塊の反力は左右ロールに均等に加わり、付着の原因となる。しかし、差速がある場合は、高速ロールが低速ロールの表面を擦ることで付着を掻き落とし、ロールクラッシャーの欠点を解消する。

2本の粉砕ロールに高/低速の差速を付けて動作させた場合、低速側のロールは高速側のロールに引きずられて、設定よりも速く回転する傾向となる。この結果、低速ロールの駆動モーターは誘導発電機となり異周波数の交流回生電流を発生する。発生した余剰電流は、回生抵抗を用いて熱に変換する制御を行っている(図4)。

粉砕ロールは、さまざまな形状や材質に対応して製作可能である。特に、2次電池材や触媒、高純度セラミック材などでは、金属コンタミネーション

てしまう。これらの欠点を解消する目的でタンデムロールクラッシャーを開発した。

## 2. タンデムロールクラッシャーの原理

写真2にタンデムロールクラッシャーの外観を示す。基本的にはロールクラッシャーと同構造であるが、2本のロールには個別に駆動モーターが設置され、個別のインバータによって回転速度と方向を任意に設定出来ることが特徴である。

2本のロールに高/低速の差速を付けて粉砕を行うと、噛み込み難いサイズの塊は低速ロール側に寄りかかる状態で高速ロールの回転を受け止め、ロー

を防ぐために  $Al_2O_3$  や  $ZrO_2$  製のロールが多く採用されている。セラミックス製のロールを搭載する場合、過度の原料噛み込みや、原料がロール間を通過した後の瞬間的なロールの衝突により、ロールの欠けや割れに配慮しなければならない。

タンデムロールクラッシャーは、1本のロールをスプリングで加圧するコンプレッション機構となっており、過剰な負荷がロールに加わった際にはスプリングバックによりセラミックスロールを保護する(写真3)。また、運転中の粉砕電流値を監視し、電流のスパイクピークが発生した際には、直ちにロールを停止させて損傷を防止する。ロール停止後は、

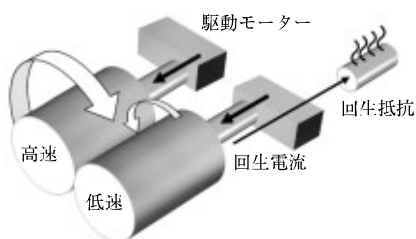


図4 差速ロール 回生制御

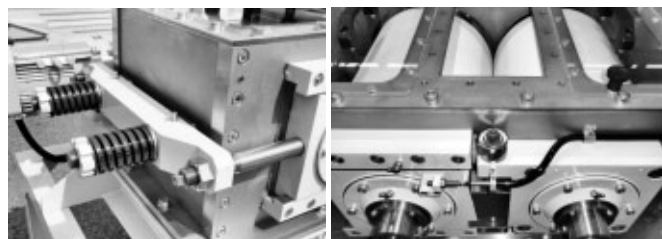
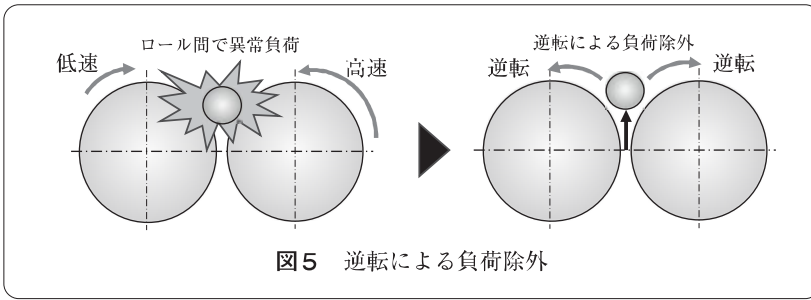


写真3 コンプレッション機構/間隙調整機構



自動的に低速逆転を行い、ロール間に噛み込んだ原料塊を投入側へ押し戻す挙動に移る。一定時間逆回転させた後は、再び通常の正転運転に戻して粉砕を再開する。スパイクピークが多発するようであれば、異常発報を行う。一連の動作は全て自動運転で対応し、パラメーターは個別に設定可能となっている(図5)。

ロール間には、クサビ型のストッパーが配置されておりロール同士の衝突を防止する。クサビ型ストッパーを上下させてロールクリアランスの設定を行う。クリアランスは、接触式測長センサーでデジタル表示される(写真3)。

前述のように、粉砕ロールはフラットやスリット付きなど、各種形状や素材で製作対応する。スリットロールでは、スリット部に原料塊が落ち込みホルドされることで、回転ロールの剪断力と摺動をより強く受け、粉砕が促進する。セラミックスロールはCIP成型加工した焼成品を当社にて表面研磨して仕

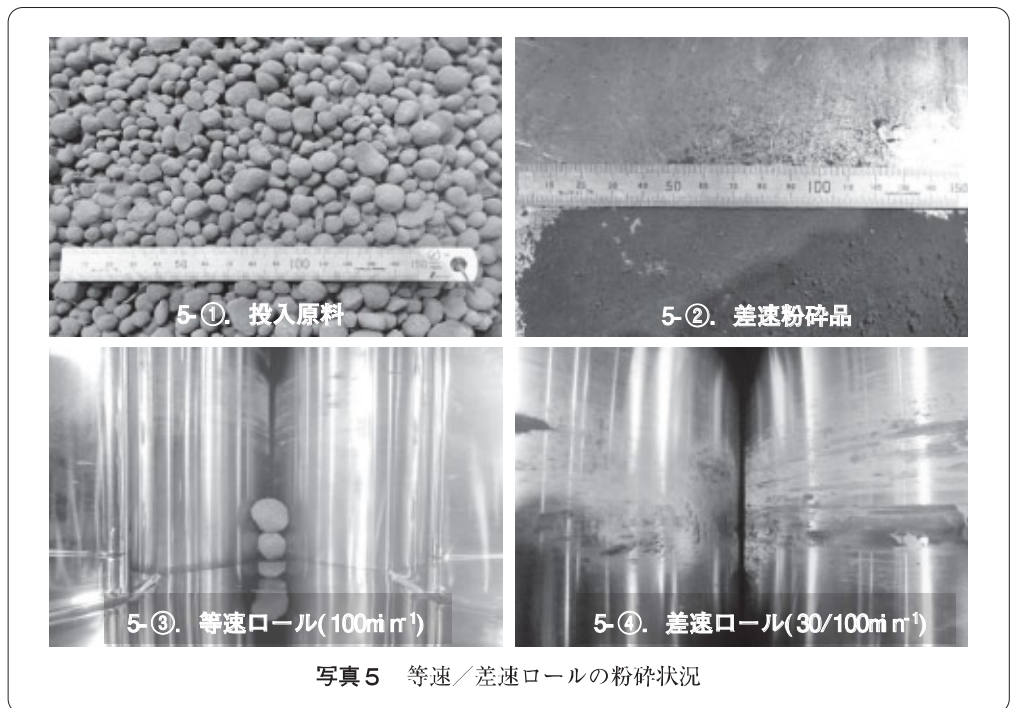
上げている。

投入原料の温度は、粉砕ロールへ大きな影響を与える。有機材や樹脂系の原料では、展性や付着性などの物性が変化し、粉砕効率を悪化させる場合がある。また、高温の原料を連続的に粉砕し続けると、伝熱によってロールが昇温し熱膨張が発生する。熱膨張はロールの径方向と長手方向の寸法を変化させる。径方向では、クサビ型ストッパーによってロールクリアランスを規制しているが、ロール長方向では、ロール端がケーシングに接触しコンタミなどを発生する恐れがある。セラミックス製のロールでは、ロールと貫通する金属シャフトの熱膨張率が異なるためシャフト径がロール内部で先行して膨張し、その圧力でロールを破損させる

恐れがある。この熱対策として、高温原料を対象とした水冷ロールがラインアップされている。中空のロールシャフト端面にロータリージョイントを装着し、冷却水をシャフトに導入してシャフトの膨張とロールの蓄熱を抑制する(写真4)。

### 3. タンデムロールクラッシャーの適用事例

ロールクラッシャーでは、原料の安定した供給が不可欠である。過度な原料供給は、ロール通過時の圧縮成形や、ロールのスプリングバックによって





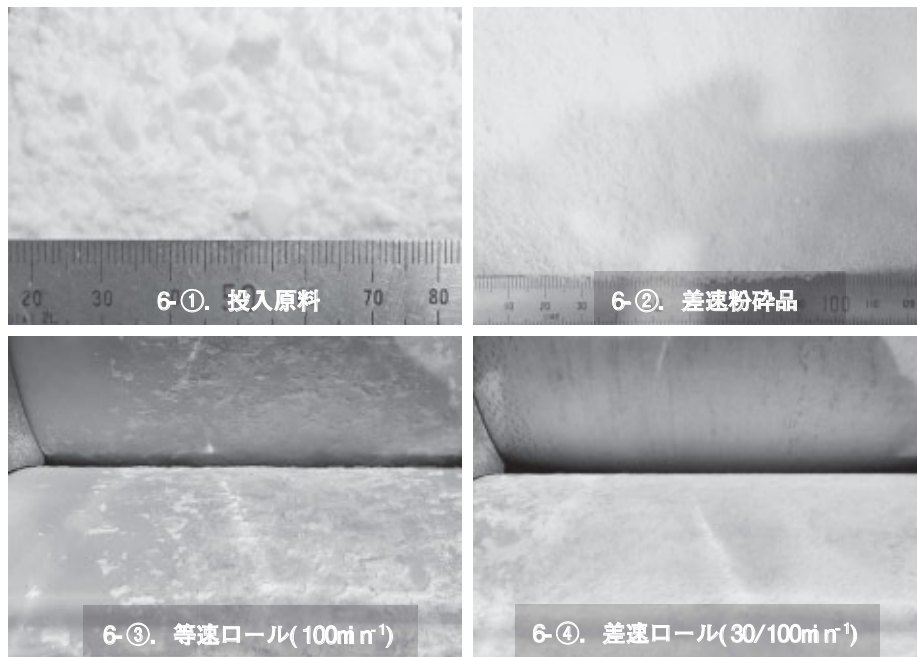


写真6 等速/差速ロールの付着状況

ロール間が広がり未粉碎品がすり抜ける現象を引き起こすことがある。一般的なロールクラッシャーの粉碎限界は、対象物の物性（劈開性、展性、付着性など）によって異なるが、概ね  $300 \sim 200 \mu\text{m}$  である。タンデムロールクラッシャーも構造的にはロールクラッシャーと同じであるが、差速摺動効果により若干微細化する傾向にある。以下に粉碎事例を示す。

写真5は、造粒乾燥したフェノール樹脂系材料の粉碎事例となる。造粒径  $\approx 10\text{mm}$  の粒をタンデムロールクラッシャー TRC-300 ( $\Phi 300 \times 350\text{L}$  ロール) で粉碎したものである。原料粒 (写真5-①) を  $100\text{min}^{-1}$  で左右等速回転しているロールに投入したが、 $10\text{mm}$  程の粒径はロールに噛み込まず残留した (写真5-③)。左右ロールに差速を付けて粉碎を行うと、全ての粒を噛み込んで粉碎し粉碎粒径は  $D50 \approx 200 \mu\text{m}$  となった。粉碎後のロール表面を写真5-④に示す。右側ロールは  $100\text{min}^{-1}$ 、左ロールは  $30\text{min}^{-1}$  回転設定で、高速回転する右ロール表面に粒をスクラッチした痕跡が認められる。

写真6は等速と差速ロール回転の付着比較となる。 $\text{Al}_2\text{O}_3$   $3 \sim 8\text{mm}$  粒 (写真6-①) を投入し付着状況を確認した。粉碎条件は、 $100\text{min}^{-1}$  の等速と  $30/100\text{min}^{-1}$  の差速回転で実施した。どちらの条件でもロール間に原料は噛み込むが、等速回転では写真6-③のように左右ロールの対称位置で圧壊に伴う付着が発生した。差速ロールでは、低速  $30\text{min}^{-1}$  下側ロールに若干の付着痕が認められたが、高速ロー

ルの摺動で平滑に近い状態であった。高速  $100\text{min}^{-1}$  上側ロールでは凹凸もなく写真5-④と同様なスクラッチ痕跡が確認された。差速によって粉碎された粒径は  $D50 \approx 100 \mu\text{m}$  となった (写真6-②)。

ロールクラッシャーは、1806年頃、英国のコンウォール州で鉱山から採掘した銅やヒ素などの鉱石を粗砕するため、発明された原始的な碎鉱機に端を発する。その後、1860年代に米国の技術者 Krom によって改良され、回

転速度が大きくスプリングで両ロールを押し付ける、現在のロールクラッシャーの原型が確立された。以降は、革新的な改良も無く今日に至っているが、タンデムロールクラッシャーは成熟したロールクラッシャーの機構を変えることなく、新しい運用を可能にした粉碎機であると考えている。

なお、弊社の本社工場には、本稿で紹介したタンデムロールクラッシャーのテスト機が常設されており、希望の方は同装置を利用することが可能である。(お問い合わせは、弊社営業まで)