シリーズ

粉体に関する生産技術の体験より

船 越 嘉 郎

Yoshiro FUNAKOSHI

私が製剤技術に関係するようになったのは、昭和38年頃だったと思う。当時、高度成長期の武田薬品は、全国各地に生産拠点を整えていた。医薬品・食品・化学品・農薬の各分野でプラントプロジェクトが相次いだ。それらのプラント制御推進の中核になって、飛び回っていたが、その潮が引いてきた時期であった。

そのため言わば、研究テーマを戦時産業から平和産業に切り替える必要があった。そして製剤技術に精出すことにした。

医薬分野においては、戦後の栄養不足に対応して、ビタミン剤を中心とする一般健康薬の発売および増産が相次いだ。当時処方に関する規制が今のように厳しくなかった関係もあって多くの主薬原料が配合・処方化され、その上今ほど製剤性のよい製剤補助原料も多くなく、また技術蓄積も乏しかった。

当然、生産効率化に加えて、トラブル解決に「てんやわんや」の状況であった。現在と同じように剤形の主力は錠剤であり、その多くは糖衣が施されていた。

錠剤成形ではキャッピングのトラブル、糖衣ではシミ出し、ヒビ割れなど、保存時の安定性に関するトラブルが多かった。

1. キャッピング現象の本質解明

キャッピングは粉体層に含まれる空気が圧縮時逃げ切れず、抜圧時、圧縮空気圧によって層状に破壊する現象だと認識されていた。当然圧縮速度が大きい生産現場で多発するものと思われていた。打錠操作に関する要因を定量的に把握しようとする動きが各社で見られた。われわれも実験用錠剤機にロードセルを付けたら、圧縮引張試験機で圧縮力カーブを採ったりすることから始めた。圧縮時間、圧縮カーブ、圧縮モードなど成形性に関する要因を故意に変えた実験を繰り返した。それでも錠剤圧縮におけるキャッピングの本質はなかなか掴めなかった。(表1)

実験用に導入したロードセル付き錠剤機だけでは何故かキャッピングが発生しない。試行錯誤を繰り返している内に、同じ型名の錠剤機でも各錠剤機によりキャッピング発生に大きな有意差があることを認めた。これは何かあるぞ！少しでも異なる個所はないか？回転盤を手動でゆっくり回して上下杵の動きを子細に観察した。正常でない使い方をして新品の錠剤機を壊して、関係者に白い目で見られることもしばしばあった。

結局、圧縮成形性は主圧縮直後の杵の動きの差に微妙に起因することが判った。さらに、ロードセル付き実験用錠剤機では、上圧縮ローラー部に付けたロードセルにガタがあり、圧縮後下杵が上昇する僅かの間、ロードセルの重みが上杵にかかって引き続いて軽く圧縮していることが認められた。こうして「圧縮後、引き続いて僅かな圧縮力で加圧しながら臼より放出する

1999年1月11日受付
京都粉体技術研究所
(〒603-8208 京都市北区紫竹西桃ノ本町21)
TEL 075-491-0502

< 著者紹介 >

大阪大学理学部物理科卒
1950年 大阪大学産業科学研究所助手
1954年 武田薬品工業株式会社入社
プラント制御、医薬製剤・食品・農薬・化成品の生産技術研究に従事
CF Granulator 他、新規粒子加工技術の開発を行う
1971年 「薬剤の造粒と圧縮成形」に関し、学位取得
1984年 武田薬品工業株式会社退社
1985年 有限会社京都粉体技術研究所設立、現在に至る
研究分野：製剤における粒子加工技術

表1 圧縮成形要因表

物理条件	キャッピング因子	粉体結合力	圧縮成形物のクラック	
			包含空気	残留応力
圧縮過程	予圧縮	圧縮度	○	
		予圧縮時間	○	
	主圧縮	最大圧縮力		○
		圧縮時間		
		圧縮力増加速度	○	
		圧縮力減少速度		○
		圧縮成形物の応力分布		○
放出過程	圧縮成形物の放出	上下きねの変位と変位速度		○
		圧縮成形物とダイス間の摩擦		○

図1 加圧放出用治具

ことにより、大幅にキャッピングを防ぐことができる」ことを見出した。

要するに、キャッピングの発生には主圧縮直後、抜圧→放出の僅かな過程の良否が強く関わるのが判り、一件落着ということになった。その後、その本質の確認の実験を繰り返し、更に定量的解析を加え、現在ではキャッピング発生機構は明確になり、防止技術も確立した。

筆者らが開発した加圧放出用治具（図1）と、ドリル硬度計を用いて行った、決定的な実験結果を、図2に示す。錠剤内部には、圧縮直後放出過程に入る前にすでにクラックが発生していることが判る。それに対し、主圧縮後、圧を抜かずに加圧放出すると、白より

放出した錠剤にも全くクラックの発生は認められない。

未知の問題解決には、現象の発生には必ず原因がある。「仮説⇔検定」を繰り返しながら、粘り強く観察と思考を続けければ、最初分かった現象も次第に見えてくるという実感を身に染みて感じとった。

2. 新型糖衣機の開発とCFグラニューレータ

2.1 傾斜型パンによる糖衣

糖衣操作は砂糖を主成分とした高粘度水溶液を錠剤表面に展延させた上、乾燥するという操作を繰り返して行われる。展延性が悪いと、綺麗な表面に仕上がらないし、展延に時間がかかると、乾燥工程に入る前に水分が錠剤内部に沁み込んでしまう。錠剤の水分が大きくなると主薬の安定性が悪くなり、変質する。乾燥速度が小さいと同様に錠剤水分が大きくなる。錠剤を綺麗に仕上げることに、錠剤水分を小さくすることは糖衣操作において必須の課題である。

今では水平軸回転方式のコーティング装置が汎用されているが、昭和50年頃までは傾斜型パンが用いられていた。傾斜型のパンは装置の前から操作しやすい利点があるが、手前の部分に大きな粒子が停滞する傾向がある。混合速度を大きくしようとして回転速度を大きくしてもスリップして流動しなくなる。パンの回転数に、ある適当な範囲があり、傾斜パンを用いる限り混合性に限界がある。混合速度は余り大きくなく、展延性もよくない。また乾燥は錠剤層の表面に熱風を

図2 ドリル硬度計による錠剤内部に発生するクラックの発生段階の解析

吹き付けて行われるので、錠剤層の内部にこもった湿気は除かれにくい。したがって乾燥速度は十分でない。総じて糖衣操作には余り適したものでない。こうした装置を用いて糖衣が行われていたのは、錠剤を傷つけることなく大事に仕上げようとしたからであろう。

傾斜型パンによる糖衣は、「液のフィード→湿潤具合を見ながら混合の介添い→タイミングをみてコーティング末の散布→混合の介添い→タイミングをみて乾燥空気ダクトのセット→乾燥具合をみて次の液フィード」の一連の操作を数十回、熟練者が経験と勘を頼りに操作していた。従って作業員によって、糖衣の仕上りの良否が生じるのは避けられなかった。

糖衣装置の改良の必要性は衆目の一致する所であった。われわれもこれを採り上げた。

2.2 新型糖衣機の考案

錠剤を傷つけずに、均一に錠剤表面に粘稠な液を展延させるためには、パンと同様、面剪断混合方式がよい。では傾斜している回転軸を垂直にすればどうなるのか？ 傾斜型パンの回転軸を垂直にすると遠心分離機のように錠剤は壁にへばりついて混合しない。粒子同士にズレがあって初めて混合が進む。固定壁を造る必要がある。化学実験に使う温浴を水平に輪切りにして下の皿部を回してみた。何とか混合する。

よく見ると、槽の上部槽壁近傍の動きが悪く停滞しがちである。それを無くすために、回転盤と同方向に回転盤に比べて少し小さい回転速度で、テフロン製の

図3 かきとり羽根付き新糖衣装置

羽根を回転し、上部槽壁を撓動することにより、固定壁周辺上部に滞留する錠剤を中心部に掻き落とす試みをした。(図3)

混合性の評価は、錠剤に着色したシロップ液を掛けて、経時的に各所に錠剤の着色具合を見て、そのバラツキを見ることによって行った。固定壁下部に少ししか着色しない錠剤がある。回転盤および掻き落とし羽根の回転速度は微妙に混合性に影響した。

装置はシンプルなのがよい。操作をしやすくするためには、装置上部に可動部がないほうがよい。槽の形状を改善することにより錠剤の動きをよくすることはできないか？ 上部槽壁近傍の滞留は、槽壁上部を内方向に湾曲することにより防ぐことができた。次に錠剤に掛かる剪断力はできるだけ均一にする必要がある。回転盤周辺上の錠剤と固定壁下部との相対速度は大きい。そこで過大な剪断力が錠剤に加わる。それを

図4 回転盤型糖衣機

防ぐために、通常「縁先」と称する湾曲してへこんだ部分を固定壁下端に設けた。この「縁先」の奥行きも微妙に錠剤の循環運動に影響した。こうして図4のような回転盤型糖衣機の概要が出来上がった。

こうしてできた装置では、錠剤は次のような循環流動を行う。回転盤の上の錠剤は遠心力によって中心より固定壁の方向に、次いで固定壁に沿って螺旋状に上昇し錠剤層表面に達すると中心部に崩れ落ちて、再び遠心力によって中心より固定壁の方向に、面剪断を受けながら移動する。液の粘度が高いため回転盤上でスリップすることなく、10秒余りの周期で循環流動する。「縁先」効果からか、心配していた錠剤のカケの発生も無く、粘稠液の展延も極めて良好であった。上部よりコーティング液を滴下すると渦をなして槽中心

下部へ吸い込まれて行く。

次に乾燥速度を上げることである。回転盤に3mmφの孔を多数あけて温風を通気した。通気量・通気温度などの通気条件を適当に選ぶことにより、大幅に乾燥速度を上げることができた。錠剤表面の乾燥度を見るために、電極板を錠剤層中に挿入して、槽壁との電気抵抗を測定し、それをメジャーとして用いた。

この装置では、「錠剤表面への液の付着→展延→乾燥→液の付着」のサイクルが規則正しく行われるので、電気抵抗計の出力が適当になったとき、次のサイクルへの切り替えを行えばよい。そして注液速度と通気量および通気温度を適当に設定すれば、熟練者の介添いの必要はなくなる。

こうして纏めた新型糖衣機の自動糖衣システムを図5に示す。

糖衣錠の重要品質の一つは、内核錠の水分が少ないことである。できた糖衣錠を油槽に入れ、一定速度で昇温して行くと、ある温度になると、糖衣層が破れガスがポツポツと出るのが観察される。この時の温度を破裂温度として、含有水分量と糖衣層強度との指標として用いた。破裂温度が高いほど含有水分が少なく、糖衣層の強度が大きいと判断される。

当時アリナミン糖衣錠の安定化が問題になっていた。早速従来法による糖衣錠と新装置によって造った糖衣錠とを比較すると、従来法のは破裂温度110度に対し新装置によるものは122度と期待した結

図5 新型糖衣機とその自動制御システム

六角パン Batch 方式

図6 六角パンによる球形顆粒の製造

果を得ることができた。

昭和43年特許出願をするとともに、色々の意味を含めて、CF装置と呼ぶことにした。

2.3 新型糖衣機の実用化

糖衣錠の品質はよく、熟練作業員も必要でなくなったが、難点は生産能力と装置コストである。

武田薬品湘南工場では、アリナミン糖衣錠の生産のために直径2mφの傾斜型パンが何台も稼働していた。昭和44年、当時工場補強のためにどの機種を選ぶかを検討することになった。生産能力の点で問題があったが機種選定の候補に選ばれた。量産品目で勝負するのは結果が決まっている。それでも検討機種として取り上げられたのは幸いであった。

会社あげてのプロジェクトにより比較実験が繰り返し広げられたが、予期したもの、残念な結果になった。

技術的には優れたものがあると信じていた。その特徴を活かして、何とかものにできないか？悩む日が続いた。

上司から「月ロケットを何故飛ばすのか君知ってるか？月の石を拾って来てどんなメリットがあるのか？例えばロケットが大気層を物凄いスピードで飛ぶときの発熱に耐えるための材料および技術はどうか？人が月に到達し、作業し再び地球に戻って来るためには、数知れぬ高度の技術が必要である。月ロケットを飛ばすことの意味は、石にあるのではなく、副次的に開発される技術にある。君、悩むことは全くない。自信をもってやり給え！」との激励の言葉ほど有り難いものはなかった。そして次のスパンスル型持続性製剤のパイロット費用として、3000万円を計上して貰ったのは生涯忘れることはできない。

2.4 スパンスル型持続性製剤

昭和38年頃だったと思う。SKF（スミス・クライン・ビーチャム）が“コンタック 600^R”と称する持

続性の風邪薬を出して注目を浴びていた。それは溶出性の異なる球形粒を適当に配合してカプセルに詰めて、消化管の中で長時間一定速度で溶出させ、一日食事時三回を、朝夕二回服用でよいようにした剤形である。

当時武田薬品では、総合ビタミン剤を多量販売しており、コンタック 600^Rに刺激を受けて、持続性のビタミン製剤を出すことになった。球形顆粒はグラニュー糖を核としてその周りに主薬をコーティングし、その上に溶出を遅延させるため、ワックスをコーティングして造るものである。設計した通りの溶出性の顆粒を造るためには、できるだけ粒度の揃った、真球度のよい表面が滑らかな主薬粒子にする必要がある。それを造るのは容易でない。

直径1m前後の傾斜六角型のパンに核粒子を仕込み、その上にシロップをスプレーして湿潤し、その上に主薬粉末を散布し、転動コーティングし、乾燥し、再びスプレー湿潤、散布、転動コーティング、乾燥という操作を百回前後繰り返し、所望の顆粒を造っていた。（図6）

湿潤が適当でないと団粒ができるし、主薬がうまくコーティングできない。混合が不十分のときは、手で介添いをし、粒の塗れ具合を観察しながら、次の操作をするといった職人芸的な製造法が採られていた。必然的に品質は勿論、歩留まりも十分でなく、工程時間も長く、生産効率も極めて悪かった。

当然のこと、工程合理化の対象になった。

2.5 新型糖衣機のスパンスル型持続製剤製造への応用

新型糖衣機の開発に当たって、流動をよくするには装置のどの部分の形状をどう設計すればよいかを、マーカーとして錠剤を使って解析したのは、装置形状の最適化に大いに役立った。粒子径が小さくなっても

図7 「気／液比—団粒」の実験例

循環流動性をよくするための要因はほとんど変わらなかった。また粒子破壊の怖れが少なく、バッフルを挿入することによって流れをコントロールできるので、流動性に関する検討はほとんど行わずに済んだ。

錠剤糖衣で問題であった周辺上部での滞留も、バッフルの挿入で解決した。糖衣層は精製の砂糖を主成分とした緻密な層により形成されているので、透湿性がほとんどない。従って一旦内核錠の中に沁み込んだ水分は、後で乾燥することによっては除くことが難しい。すなわち注液→展延→乾燥の1サイクル毎に、十分乾燥しておくことが必要である。ところが、錠剤に比べて小さく比表面積の大きい粒子に、砂糖のように緻密な層を形成しない粉末をコーティングする場合には、後乾燥でよく、糖衣のようなサイクル操作は必要でない。

幸い新装置では循環流を形成し循環速度も大きい。従って適当な個所に注液し、粉末が母粒子に付着するのに適した水分状態に粒子表面を保って、その上に粉末を連続散布すればよい。すなわち、糖衣における「スプレー湿润→展延→散布被覆→展延」のサイクル操作が、粉末コーティング造粒では、「スプレー湿润ゾーン、展延ゾーン、散布被覆ゾーン、展延ゾーン」の各ゾーンを、粒子が順次通過するように、装置内でゾーンを形成する」ことに置き換えられる。

次はこのSystemの操作条件の最適化である。湿润するためのスプレーミスト径は処理する粒子径に比べ十分小さくなければならない。大きければ粒子同士が結合して団粒発生に連なる。また湿潤度が過剰になれば

図8 造粒システムの制御系とその操作条件

ばこれまた団粒発生の原因となる。「スプレーミスト径—団粒」、「湿潤度（液／固比）—団粒」の関係の子

表2 粉末コーティング造粒の再現性

No.	核粒子 仕込量 g	粉 末 散布量 g	結合液 噴霧量 ml	供 給 固形分 g	主薬率 %	造粒品 収 量 g	良品率 %	団粒率 %	付着率 %	飛散率 %	平均粒径 μm	粒径分布 (σ) μm	核 粒 子	
													平均粒径 μm	粒径分布 (σ) μm
1	2250	1960	865	2720	72.0	4970	98.75	1.25	0.05	4.5	760	60	562	60
2	"	"	865	2720	72.0	4900	98.15	1.81	0.15	4.1	770	50		
3	"	"	855	2715	72.4	4945	98.58	1.42	0.04	3.4	760	50		
4	"	"	870	2726	71.8	4885	99.52	0.48	0.20	4.9	750	50		
5	"	"	865	2720	72.0	4920	99.19	0.81	0.17	3.7	760	60		
平均			865	2720	72.0	4924	98.84	1.15	0.13	4.1	760	54		
σ			4.5	3.5	0.2	37	0.48	0.37	0.065	0.54	3	2		

細に調べて最適条件を求めた。

スプレーミスト径は二流体ノズルの「気／液比」を大きく設定することにより小さくした。気／液比―団粒の関係を図7に示す。また湿潤度は電極間抵抗が最適になるようスプレー液供給を操作して制御した。造粒システムの制御系とその操作条件を図8に示す。

ここに本システムによる粉末コーティング造粒の再現性を表2に示す。

生産に供するためにはスケールアップが必要である。混合のエネルギー源は回転盤である。エネルギーの上部への伝達は槽スケールによってそれほど変わらない。仕込み量を増やそうとすれば勢い、回転盤径を大きくするより手はない。回転盤と固定壁との間隙は十分小さくないと粉末が間隙から落下する。回転盤と固定側壁下端との間隙を、0.2mmと設定した。また粒子の噛み込みを防ぐため間隙に線速2-4m/sのスリットエアを噴出させ、散布粉末の落下を防いだ。回転盤径が1mを超えると、回転盤と固定側壁下端との間隙を0.2mmとするには、工作精度の面から加工が大変である。経済面より考えて回転盤径を最大1300mmと考えた。そして、200mm ϕ 、360mm ϕ 、430mm ϕ の実験機での混合実験結果に基づいて、SUSで1000mm ϕ のパイロット実験用の造粒機を製作した。

各スケールの混合性の評価は、一定量の高粘度液を滴下した後、電気抵抗式水分計の指示が一定値になるまでの経過時間を調べて行った。スケールによる差は図9の如く許せる範囲であった。

本システムは作業員の介添いなく、真球度の高い粒が再現性よくできる。このシステムを活用することにより、今まで仕上げに数日も掛かり、しかも品質バラツキの大きかった球形顆粒の製造が、1時間程度で再現性よく行えるようになった。このことは生産効率の

図9 スケールと混合性

面は言うまでもないが、製剤設計が従来に比べ格段に効率的に行えるようになったことの効果は大きい。

その後、武田薬品社内において新製品開発に役立ったことは言うまでもない。本装置が現在 SKF を始めとして、国内外で本システムが汎用されている現状を思うと感慨深いものがある。

またこの技術が造粒分野で、湿潤度を始めとするフィードバックシステムを採用する切っ掛けを作ったことの意義も大きい。

苦しかった当時の上司の激励の言葉が思い起こされる。因みに昭和45年に開発したこの装置は今もほと

んどその原形を変えぬまま用いられていることは、何
か誇らしさを禁じ得ない。

装置の開発は、機能を満たすための必要条件の整理
とその合理的な具体化の積み上げである。粘り強く息
長く積み上げてゆくことにより初めて筋の通った装置
が出来上がる。しかし、時間的にも、経済的にもその
ような余裕が、若い人に与えられることの少ない現状
は寂しく思われる。

3. 粉体連続プロセス技術

現在医薬製剤のプロセスは、生産単位が小さいこと
と、品質保証の考慮からバッチ方式がほとんどであ
る。しかしその他の分野の粉体プロセスでは、連続プ
ロセスが多い。

武田薬品在籍中および最近の経験から、特に過ちを
犯しやすい一、二の事例を紹介する。

3.1 調味料の連続製造システム

武田薬品では「いの一審[®]」というグルタミン酸
ソーダを主成分とする複合調味料を製造販売してい
た。このものの剤形は押出顆粒である。それに対し
て、同業他社製品はグルタミン酸ソーダの結晶にイノ
シン酸やグアニル酸をコーティングしたもので、見場
がよい。

押出顆粒は成分均一性はよいが、薬品のようなイ
メージがあり、食卓用としてはハンディーがある。そ
こでグルタミン酸ソーダ結晶にコーティングした製品
を商品化する計画が立てられた。昭和40年前後であ
ったと記憶する。

取りあえず、できるだけ綺麗なグルタミン酸ソーダ
結晶を選択した。次にコーティング方法の選択であ
る。それまで武田では、ワースターコーティング法、
すなわち、気流中に流動している結晶粒子に、コーテ
ィング溶液をスプレーし、そのまま乾燥させる方法に
よって製造される「タケ塩[®]」という製品があった。
この技術を活用することも考えた。この「タケ塩[®]」
を顕微鏡で覗くと、コーティング成分が霜降り状に結
晶粒子にくっついていて透明感に乏しい。二番手、三
番手の後発品であることから、ちょっとでも美しいも
のにしたい。何とか透明感のよいものを造れないか？
コーティング溶液が結晶粒子にくっついた後、速やか
に乾燥することが、霜降り状になる原因であることは
容易に想像できる。

そこで、グルタミン酸ソーダ結晶粒子を水で適当に
湿潤した後、その上にイノシン酸結晶およびグアニル
酸結晶を散布し、グルタミン酸ソーダ結晶粒子の表面

図10 調味料の連続コーティングプロセス

でゆっくり晶出付着させるいわゆる「なまし晶出工
程」を乾燥前に入れたらどうか？ こんな考えのもと
に、試作品を造ってみた。

こうした方法で試作した製品の評価は、まずまずと
いう所であった。

次はプロセス設計である。勿論連続プロセスであ
る。適当時間の「なまし晶出工程」をとるためには
ホールドアップを大きく採らねばならない。ちょうど
その頃、東京工大の白井先生グループが中心になっ
て、縦型通気攪拌流動層が研究され、それが流行にな
っていた。

早速、この縦型通気攪拌流動層を活用することを考
えた。粒子を壊さない程度のゆっくりした攪拌下で、
水で適度に湿潤したグルタミン酸ソーダ結晶粒子を、
通気攪拌塔の上部にフィードし、その上にイノシン酸
結晶およびグアニル酸結晶を散布、ゆっくり攪拌す
る。湿潤したグルタミン酸ソーダ結晶粒子の表面に付
着したイノシン酸結晶およびグアニル酸結晶は、塔下
部から通気された温風と向流接触しながら塔上部から
下部に移動しながら晶出する。装置下部からの通気は
浮遊化流速以下の線速に保たれ、粒子群と温度交換お
よび湿分交換する。装置下部の空気は温度は高く、乾
燥している。熱交換および湿分交換をしながら上昇し
た空気は、装置上部では温度は低下し、飽和湿度に近
くなっている。こうして装置最上部は「コーティング
ゾーン」、その下は「なまし晶出ゾーン」、下部は「乾
燥ゾーン」ということになって、連続コーティングプ
ロセスが構成される。その原理図を図10に示す。

200mm φ のアクリルパイプで造ったパイロット

は、一応の目的を達した。早速特許出願の手続きを済ませた。

パイロットによる試製品は期待した評価を得た。営業は慾が出るもので、早速、歳暮贈答品用に使いたいということになった。営業に言われるままパイロットを工場に移し贈答品用半製品を造る体制を整えた。

最初は調子良く所望の外観および成分含量の製品が出てくる。ところが、昼夜連続運転して10数時間経った頃から、次第にイノシン酸、グアニル酸の含量が低下してくるではないか！ これはおかしい。

よく調べてみると、コーティングされた粒子が装置下部で高温の熱風に曝され、粒子表面のイノシン酸およびグアニル酸の結晶水の一部が外れて、イノシン酸、グアニル酸が微粉化して、熱風とともに上層に移動する。それにより装置下部より排出する粒子のイノシン酸およびグアニル酸含量が次第に低下する現象であることが判った。

短時間の実験では認識しにくい現象が、連続プロセスでは積分されて長時間後に現れることを初めて体験し苦渋を味わった。苦渋はさらに続く。造った半製品を食卓用の容器に詰めて暫く静置しておくと、粒子が容器瓶の底にブロックして瓶から出てこない。トントンとショックを与えてようやく出るようになる。これでは製品にならない。これも先述の結晶水が飛んだイノシン酸、グアニル酸が、容器瓶の中で再び水を取って結晶化するためであることが判った。

考えてみれば、本プロセスの発想は、ゆっくり晶出乾燥することと、白井式通気攪拌流動層を活用しようという単純な発想で、詳細な検討を怠っていた。

新糖衣装置や粉末コーティング造粒装置のように、素朴に装置機能を満足させるための必要条件を整理し、その具体化を積み重ねて、構築した装置ではない。言わば「勝手読み」である。「勝手読み」は不可である。瓶につめた保存試験も全くせずに物造りに走った咎めであった。軽率そのものであった。また技術の反省も無く、営業の言うままに乗ってしまったのが悔やまれる。

時を同じうして、従来ロータリー式キルンによって製造されていた活性炭の製造工程の合理化に、例の通気攪拌の技術を応用しようと新技術開発プロジェクトが組まれていた。これも同様無惨な結果に終わった。化学反応を伴う連続移動層はよくよく検討を重ねないと成功しないものである、思い付きでよい装置なりプロセスの開発はできないものとつくづく悟った。

図11 ローラーコンパクター原理図

3.2 微粉炭の連続塊成システム

数年前、或る大手鉄鋼メーカーより相談があった。微粉炭をバインダー無しで、ローラーコンパクターで造粒しようというものである。「パイロットではうまく行ったが、折角造った本プラントでは全然造粒できない。どうも微粉炭の中に含まれている空気が災いしているようだが、ローラーコンパクティングについて粉体工学会誌に載っていたお前の文献が役立ちそうだから、相談に乗ってくれ」というような次第であった。

『本当にパイロットでうまく行ったのか？ もし行ったのなら、本プラントでも必ずうまく行く筈だ。パイロットでうまく行き、本プラントでうまく行かないのであれば、きっと何か必要条件を落として、本プラントで飛躍があったからと思う。それを正せば必ずうまく行くと思う。それほど悲観することはないよ』と勇気づけた。

ローラーコンパクターの原理図を図11に示す。供給スクリーで適当に圧密された原料粉末は、二つのローラーの表面摩擦によってローラー間に挟み込まれ、圧縮固化する。連続プロセスであるから、供給スクリー部に送られてくる粉末量と二つのローラー間から吐き出される粉末量とが等しくなければ、供給スクリー部にある粉末量が経時的に変化する。もし二つのローラーの間から吐き出される粉末量のほうが多ければ、供給スクリー部の粉末量が次第に少なくなると、供給スクリー部における圧密が不十分になる。またスクリー部における圧密が適当でなければ、ローラーで圧縮固化できない。その結果、予期する圧縮固化ができなくなる。このバランスをとるためには、スクリー部の圧密を適当にした上で供給スクリー部に送られてくる粉末量と同量だけ、二つのローラー間から吐き出すように操作する必要がある。

よくよく聴いてみると、前後の工程の物の流れを考慮して、最初からロール間隔を定常状態になったときと同じ値（10mm）に設定してスタートしているのである。供給スクリー部の粉末が圧縮固化に最適な状態に十分圧密されていない内に、ローラー間隔を広くしてローラーを回転すると、圧縮不十分のまま粉末が流れ出るのは当然である。『最初二つのローラー間隔を十分小さくしておき、供給スクリー部の粉末量が多くなり、供給スクリー部での圧密が高まって押し込む力が大きくなるにつれ、ローラー間圧縮力に抗して自然とローラー間隔が開くように操作すればよい。ローラー間隔は故意に設定するものでなく、物流のバランスによって自然に決まるようにすればよい云々』と予言した。

果たして、パイロットの再現ができるではないか！予言が的中して大いに面目を施した次第である。

供給スクリー部に含まれる空気が災いしていると即断し、ローラーコンパクターの押し込みスクリー部にある粉末層中の空気圧の測定に特殊の工夫をし、

また空気が逃げやすくするために、スケールアップとともに大きくなったロール幅を分割して、実効ロール幅がパイロットと等しくなるように、ロールの改造を試みたり、担当者の努力および知恵の結集は相当なものであった

一般に連続プロセスでは、そのプロセスに入ってくる量と、そこから出てゆく量とが同量でなければ、ホールドアップが次第に変化する。そして各部分の最適状態からずれてくる。これが色々な現象を引き起こす。残念ながら、この何でもない原理原則に関する認識が薄かったのである。

バッチ式プロセスでは各バッチ毎のバラツキに注意を払えばよいが、連続プロセスでは時間という要素の考慮を十分払っておかなければ、とんでもない過ちを犯すものである。

筆者が粉体プロセスに関わって40年になろうとしている。その中から若い人に参考になろうと思われる一、二の事例を紹介した。