

## 高速回転円盤を用いた循環型低温気化装置の開発

泉川達哉、高安正勝<sup>1</sup>、津嘉山貞雄<sup>2</sup>

回転円盤式噴霧乾燥機における乾燥チャンバ内の熱流動解析を行い、定性的な手法を用いて熱風の吹き込み方法を決定した。更に回転円盤から噴射される噴霧粒子と熱風の相互作用を考慮した二相流解析を行い、乾燥チャンバ内における噴霧粒子の挙動や蒸発時間を調べた。これらの解析結果に基づき設計した装置による海水の気化実験では十分な性能を確認することができた。

### 1 はじめに

ベンチャー高安(有)では、回転円盤を用いた噴霧乾燥法による製塩を行っている。この手法は噴霧を作る機構として高速に回転する円盤を用いているため、ノズル式の噴霧機構では対応できない高粘度の液体や不純物を多く含む液体に対しても、目詰まりすることなく対応できる可能性がある。また、直接、処理液を煮詰める手法と比較し、被乾燥物に対する熱的影響が少ないなどの優れた特徴も有している。

沖縄県内には、独自の亜熱帯植物が多く生息しており、近年、その植物類の優れた機能性に着目した健康食品の開発が盛んに行われている。しかしながら、食品の加工工程における有用成分の濃縮化や粉体化は、加工コストが高いことから県内の健康食品業界における共通の課題となっている。また二流体ノズル式の噴霧乾燥機などでは、粘性が高く、固形物を多く含む液体の加工は困難になる場合が多い。

本研究開発は、現在、製塩工程で使用している回転円盤による気化技術を応用し、高粘度の液体にも対応でき、更に得られる粉体の成分調整が可能な循環型気化装置の開発を目的としたものである。

本報告では、主に気化装置の設計段階で行った熱流動解析について述べる。

### 2 装置概要

開発した装置の概略を図1に示す。乾燥チャンバは円筒形状で直径2m、高さは2.8mである。一般に、噴霧乾燥機は噴霧と熱風の接触方法や、気液混合の方法、粉体の回収方法により分類されるが、本装置は噴霧と熱風の十分な接触時間を確保するため、両者とも乾燥チャンバの上部から下部へ流れる垂直下降並流型とし、更に気液の混合効率を高めるため熱風に僅かな旋回運動を与えている。粉体の回収方法としては、特別な動力を必要としないサイクロンを採用した。装置の仕様を一般的な二

流体ノズル式噴霧乾燥機と比較し表1に示す。回転円盤式の場合に比較的大きな乾燥チャンバが必要となるのは、円盤から噴射される噴霧粒子が広範囲に広がるためである。

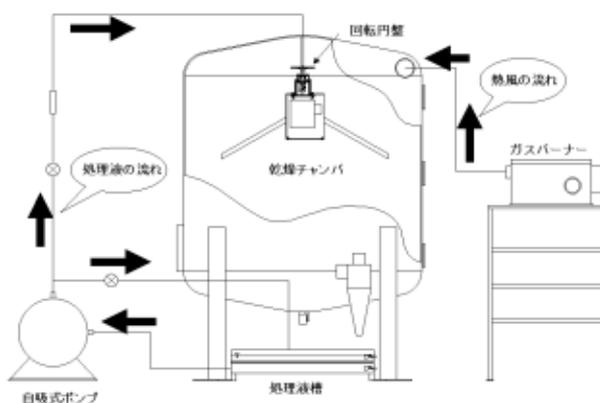


図1 装置概略

表1 装置仕様

	開発装置	二流体ノズル式
処理量 (ℓ/min)	1	0.05
投入熱量(kW)	93	4
熱風量 (m <sup>3</sup> /min)	12	1
乾燥チャンバ容積(m <sup>3</sup> )	8.5( 2m)	0.159
投入熱量/処理量	93	80
容積/処理量	8.5	3.18

### 3 装置内の流れ解析

#### 3-1 方法

熱風の吹き込み方法を最適化するため乾燥チャンバ内の熱流動解析を行った。ここで使用したのは、有限体積法を用いた熱流体解析ソフト「FLUENT ver6.1」である。解析は次の3つのケースについて行い、その温度や速度分布を定性的に比較した。尚、計算で使用した乱流モデルは標準k-モデルに比べ、渦や旋回などのある流

れをより正確に表現できるRealizable k- モデルである。

ケース①：熱風を乾燥チャンバの接線方向に吹き込む。入口は1カ所。(図2)

ケース②：乾燥チャンバの中心付近に回転流れを生じよう、対向する2つの熱風の入口を乾燥チャンバ中心から半径方向に僅かにずらす。(図3)

ケース③：乾燥チャンバ内に回転流れを生じよう、3カ所から熱風を送り込む。(図4)

いずれのケースでも熱風の入口高さは、回転円盤の上部付近(チャンバ最下部から2.035m)とした。また、熱風量は $10\text{m}^3/\text{min}$ であり、入口が複数あるケースでは、その流量が均等に振り分けられるとした。

表2に、それぞれのケースに関する境界条件を示す。乾燥チャンバは、ステンレスタンクの表面に断熱塗料を塗布し、更に断熱材を巻いた構造となっているため、これら3つの材料から算出した平均熱伝導率を壁面の条件として用いた。また表中の熱伝達係数は外気と乾燥チャンバの壁面間における熱伝達に関連するもので、乾燥チャンバ内の流体と壁面との熱伝達は、壁面近傍の流れ場の状態から標準壁関数を用いて計算した。

### 3-2 結果と考察

それぞれのケースについて、熱風の入り口付近の断面における温度分布を図5～7、速度ベクトルを図8～10に示す。ケース①は、熱風速度が最も大きく、しかも乾燥チャンバの接線方向へ吹き込む流れとしたことから、乾燥チャンバ内の攪拌力が大きく、一様な温度分布の得られることが期待された。しかし解析結果からは、熱風が乾燥チャンバの内壁に直接衝突し、その熱量が殆ど壁面に奪われていることが示唆される。また速度ベクトルについても、その値が大きいのは壁面近傍のみに限られ、乾燥チャンバ全体での攪拌能力は期待出来ないことが分かる。ケース②では、乾燥チャンバ内へ流れ込む熱量が、噴霧粒子群の発生する回転円盤付近の温度を上昇させており、噴霧を気化させるのに有利な温度分布となることが分かる。しかし、速度ベクトル図からは、乾燥チャンバ内における旋回流は確認できない。ケース③では、回転円盤付近の温度が更に高く、一様に分布していることが分かる。また、比較的強い旋回流を生じていることも確認できる。これらの解析結果から、熱風の吹き込み方法として、ケース③を採用することにした。



図2 ケース①



図3 ケース②



図4 ケース③

表2 熱流動解析の境界条件

		ケース	ケース	ケース
入口境界	入口直径(m)	0.15	0.125	0.1
	速度(m/s)	9.4	6.8	7.1
	温度( )	100	100	100
出口境界	圧力(kPa)	101	101	101
	温度( )	15	15	15
壁面境界	熱伝導率(W/m/K)	0.0497	0.0497	0.0497
	熱伝達係数(W/m <sup>2</sup> /K)	10	10	10
	外気温度( )	15	15	15

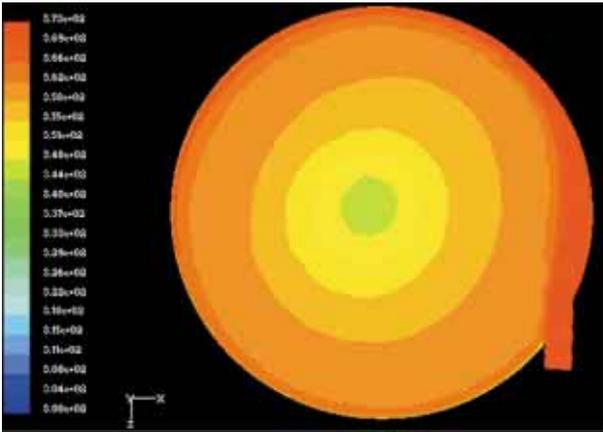


図5 温度分布(K) ケース①

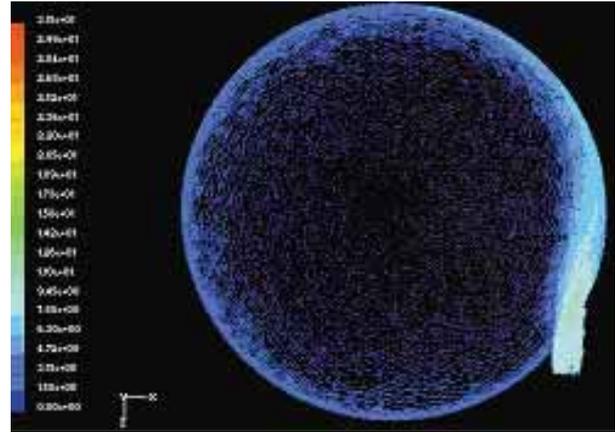


図8 速度分布(m/s) ケース①

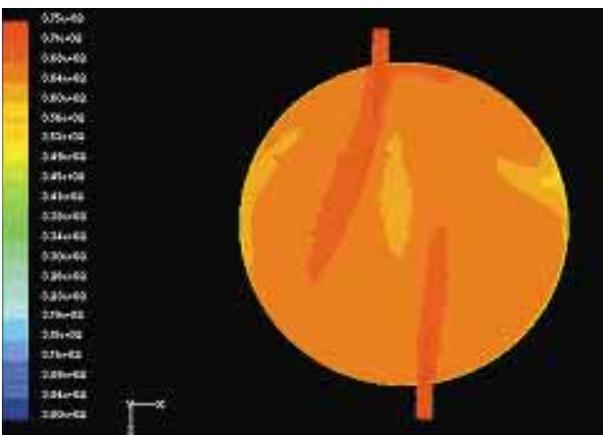


図6 温度分布(K) ケース②

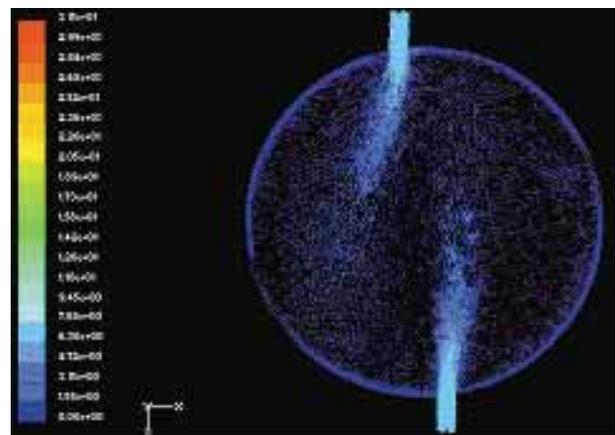


図9 速度分布(m/s) ケース②

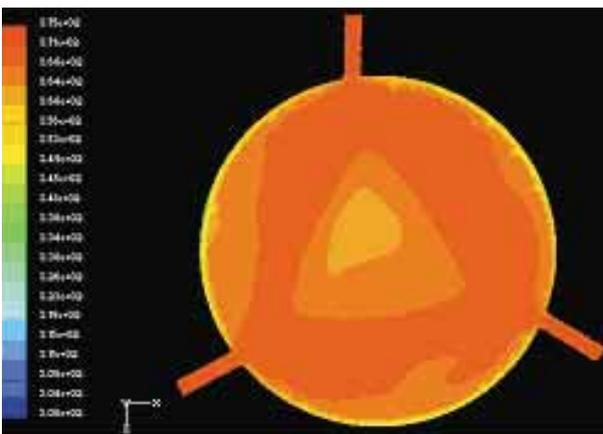


図7 温度分布(K) ケース③

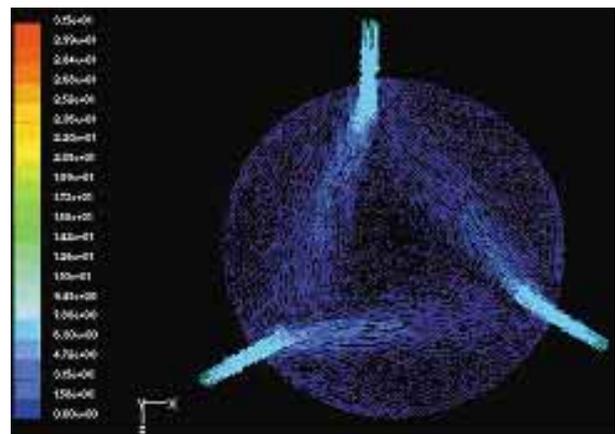


図10 速度分布(m/s) ケース③

#### 4 噴霧粒子の挙動解析

##### 4 - 1 方法

乾燥チャンバ内での噴霧粒子の挙動を調べるため、前述のケース に対する流れ場の定常解を初期条件とし、更にラグランジュの評価基準を用いた分散相（噴霧粒子群）を加えた非定常解析を行った。ここでは連続相（熱

風の流動)と分散相間の熱伝達と物質移動の計算とともに、分散相粒子の飛跡の計算を行っている。また連続相と分散相の連成と、その連成が分散相の飛跡と連続相流れに及ぼす影響も考慮した。分散相の計算では、その体積分率が10%未満であることが制約条件となっており、これを超える場合は、一般の混相流モデルを使用する必要があるが、本装置での処理量  $1 \text{ ㄩㄌ}/\text{min}$  および流入熱風量  $10 \text{ m}^3/\text{min}$  に対しては、分散相での計算が可能である。このような分散相モデルを使用した二相流解析を行うことで、回転円盤から放出された噴霧粒子の飛跡や蒸発の過程を調べることができる。

噴霧粒子の飛跡は、ラグランジュ的な基準で表現された粒子に作用する力の釣り合い式(1)を積分することによって求めている。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g(\rho_p - \rho) / \rho_p \quad \dots \dots (1)$$

ここで  $u_p$  は粒子速度、 $u$  は連続相の流体速度、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は流体密度、 $\rho_p$  は粒子の密度であり、右辺第1項は単位粒子質量当たりの抵抗力、第2項は重力の項である。

$F_D$  は式(2)のように表される。

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad \dots \dots (2)$$

ここで  $\mu$  は流体の粘度、 $d_p$  は粒子直径である。また  $Re$  は式(3)で定義される相対レイノルズ数である。

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad \dots \dots (3)$$

$C_D$  は抵抗係数で Spherical 法則によって式(4)で算出される値を用いている。ここで、定数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  は広い  $Re$  の範囲において滑らかな球形粒子に適用される値である<sup>1)</sup>。

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad \dots \dots (4)$$

回転円盤から放出される噴霧粒子の粒径分布は、ロジラムラ (Rosin-Rammler) 分布で近似した。この分布は式(5)のように表され、平均粒径と分布のパラツキ度合いを表す散乱変数を指定すると、ある粒径  $d$  より大きな粒子が噴霧粒子群全体の体積に占める割合を求めることができる<sup>2)</sup>。

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad \dots \dots (5)$$

ここで  $Y_d$  は粒径  $d$  より大きい粒子の体積割合、 $\bar{d}$  は平均粒径、 $d$  は粒径、 $n$  は散乱変数である。平均粒径  $\bar{d}$  は式(6)で表されるゾウターの平均粒径を用いた<sup>(2)</sup>。式(6)では、噴霧粒子径は円盤の先端速度に反比例し処理液量

に比例することが示されている。

$$D_{3,2} = 1.62 \times 10^{-3} N^{(-0.53)} M^{0.21} (2r)^{(-0.39)} \quad \dots \dots (6)$$

ここで  $N$  は回転数 (rps)、 $M$  は処理液量 (kg/s)、 $r$  は回転円盤直径 (m) である。

開発する装置は、回転数 166 (rps) (10,000 rpm)、最大処理量 0.0166 (kg/s) (1 ㄩㄌ/min)、回転円盤直径 0.2 m であるのでゾウターの平均粒径は約  $65 \text{ ㄩ}\text{m}$  となる。

散乱変数は、実際にベンチャー高安衛の乾燥室内に堆積した粉体の粒径分布と、工場における回転円盤の運転条件から求めたロジラムラ分布を比較することで 2.5 と決定した。粒径分布の測定に使用したのは、レーザー回折式粒度分布測定装置 (株島津製作所製: SALD-3000) である。

解析において使用した噴霧粒子に関する噴射条件を表 3 に示す。

表 3 噴射条件

最大粒径 ( $\mu\text{m}$ )	101	初速度 (m/s)	104
最小粒径 ( $\mu\text{m}$ )	20	散乱変数	2.5
平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	65		

乾燥チャンバ内の噴霧粒子温度は、周囲の熱風と接触することで上昇し、その温度が設定された蒸発温度  $T_{\text{vap}}$  に達すると噴霧粒子から連続相への物質移動が始まる。本解析では、 $T_{\text{vap}}$  は乾燥チャンバに入り込む熱風の湿球温度であると近似した<sup>3)</sup>。

初期条件として与えた噴霧粒子温度  $T_0$  から蒸発温度  $T_{\text{vap}}$  に達するまでに行われる噴霧粒子と連続相間の熱伝達は式(7)によって求められる。ここでは粒子の温度は全体に均一であると仮定している。

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) \quad \dots \dots (7)$$

ただし  $m_p$  は粒子質量 (kg)、 $C_p$  は粒子の熱容量 (J/kg/K)、 $T_p$  は粒子温度 (K)、 $A_p$  は粒子表面積 ( $\text{m}^2$ )、 $T_\infty$  は連続相の局所温度 (K)、 $h$  は式(8)から求められる対流熱伝達係数 ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ) である<sup>4)</sup>。

$$Nu = \frac{hd_p}{k_c} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad \dots \dots (8)$$

ここで  $d_p$  は粒子直径 (m)、 $k_c$  は連続相の熱伝導率 ( $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ )、 $Re_d$  は粒子直径と相対速度によるレイノルズ数、 $Pr$  は連続相のプラントル数である。

噴霧粒子の温度が蒸発温度  $T_{\text{vap}}$  に達した後の物質移動は式(9)によって計算した。この物質移動は、噴霧粒子の揮発分が完全に消費し尽くされるまで継続される。

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \dots \dots \dots (9)$$

ここで $N_i$ は蒸気のマッフル流速(kmol/m<sup>2</sup>/s)、 $k_c$ は物質移動係数(m/s)、 $C_{i,s}$ は粒子表面における蒸気濃度(kmol/m<sup>3</sup>)、 $C_{i,\infty}$ は粒子周囲の連続相における蒸気濃度(kmol/m<sup>3</sup>)である。蒸発過程の解析に用いた噴霧粒子に関する物性値を表4に示す。

表4 噴霧粒子の物性値

密度(kg/m <sup>3</sup> )	998.2	揮発成分(%)	100
比熱(J/kg/K)	4182	飽和蒸気圧(Pa)	2337
熱伝導率(W/m/K)	0.602	分解熱(J/kg)	0
粘度(kg/m/s)	0.001	表面張力(N/m)	$7.25 \times 10^{-2}$
蒸発温度(K)	308.5	潜熱(J/kg)	2,262,960
沸騰温度(K)	373	拡散係数	$3.22 \times 10^{-5}$

#### 4 - 2 結果と考察

噴霧粒子が回転円盤から噴射されて0.02秒後の様子を図11に示す。従来の研究によると、回転円盤から発生する噴霧粒子群は、円盤端から上下左右180度に広がることが示されているが<sup>3)</sup>、本解析では、ロジランムラ分布で決定された径を持つ粒子を、円盤の円周を16等分した方向に、それぞれ20個づつ水平に噴射している。図11において、噴霧粒子の噴射された各方向で粒子位置のバラツキが生じているのは、粒の大きさによって慣性力が異なるためである。図12には0.5秒後、図13には0.845秒後の様子を示す。図12では一部の小さな粒子が気化していること、および粒子は単純な放射状に広がるのではなく、熱風の流れによって複雑な飛跡を示すことが分かる。図13になると殆どの粒子が気化している。

解析の結果、回転円盤から噴射された粒子は、中心から0.7m程離れた位置まで放射状に広がり、その後、乾燥チャンバ内の流れによって移動しながら気化していくことが確認された。懸念された乾燥チャンバ内壁への粒子の衝突は見られなかった。また、噴霧粒子が完全に気化した後、乾燥チャンバ内の温度低下量は約15degであることが示された。

本装置では、処理液量が乾燥チャンバの雰囲気温度で決まる許容量を超えた場合、乾燥チャンバ内の温度が大きく低下し、連続的に気化を続けることが難しくなる。また、一旦、そのような状態になると水分を含んだ粉体が装置内壁に付着してしまうため、装置を運転する際は、処理量に合わせた適切な温度制御が必要となる。

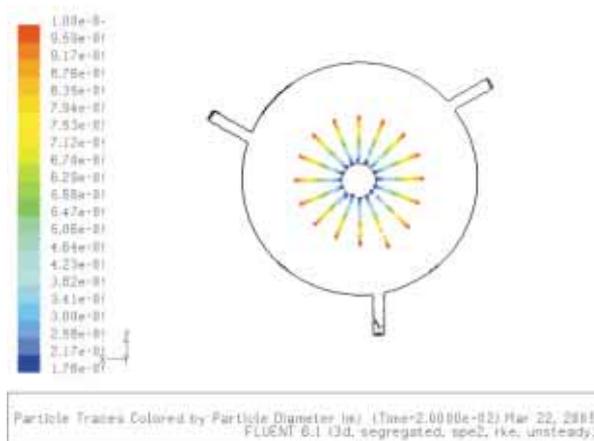


図11 噴霧粒子の挙動 (0.02秒後)

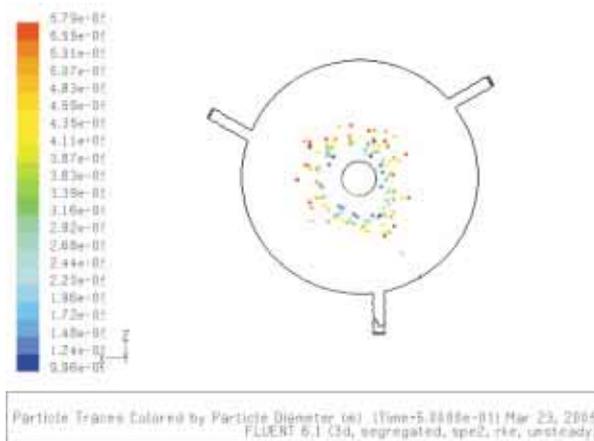


図12 噴霧粒子の挙動 (0.5秒後)

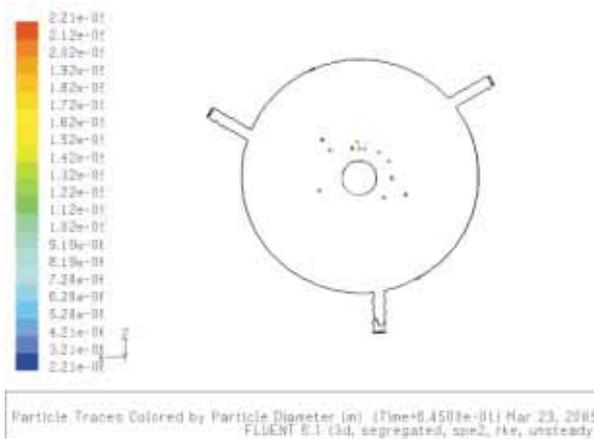


図13 噴霧粒子の挙動 (0.845秒後)

## 5 装置製作

本装置は、高速回転モーターが乾燥チャンバ内に設置されているため、モーターの冷却機構が必要となる。ここではモーターハウジングを支えるパイプを通じて大量の冷却用空気を送り込む構造とした。また安全で使いやすい装置とするため、下記の装備機器を付加した。

**観察窓** アクリル製の観察窓を乾燥チャンバ上面3カ所、側面3カ所に設けた。

**出入り用ハッチ** 乾燥チャンバ内へ作業が入れるよう気密性に優れたハッチを設けた。

**タラップ、手摺り** 乾燥チャンバ上部へのタラップ、最上部を取り囲む手摺りを設け、作業者の安全性を確保した。

**エアヒーター** ガスバーナーの熱量を効率よく空気へ伝えるためエアヒーターを製作した。ガスバーナーからの火炎方向と送風用ブロアの送風方向を直交させ、更にブロアからの空気が直接、火炎に当たらないように、バーナーとブロアの取り付け位置を工夫した。

**圧力チャンバ** 乾燥チャンバの上部3カ所から吹き込む熱風量を均等にするため、吹き込む直前に圧力チャンバを設けた。

**温度センサ** 熱電対を乾燥チャンバの上中下3カ所に取り付けした。

完成後の装置を図14に示す。

## 6 気化実験

開発した装置の気化性能を把握するため、まず水道水を用いた気化実験を行った。実験当日の気温は14℃、湿度は54%であった。ガスバーナーの点火後、約15分で乾燥チャンバ内の温度は152℃（センサ1：最下端から高さ約2mの位置）、135℃（センサ2：同様に高さ約1.5mの位置）、108℃（センサ3：同様に高さ約1mの位置）となり、水の注入を開始した。処理量0.5%/分を約10分間注入した結果、最も噴霧に近いセンサ1の温度は、30℃近く下がり121℃となったが、センサ3の位置での温度低下量は約15℃程度であった。その後、徐々に処理量を増やし0.8%/minで約40分程度運転を続けた結果、センサ3での温度が80℃を下回り、乾燥チャンバの底面において気化しなかった処理液が溜まり始めた。これらの実験の結果、安定的に処理を続けるためにはセンサ3での温度が90℃程度必要であることが分かった。

次に海水による気化実験を行った。水道水の場合と同様な手順で乾燥チャンバ内の温度を調整し、十分な温度上昇を確認した後、海水の注入を行った。その結果0.8%/minの処理能力を確認することが出来た。

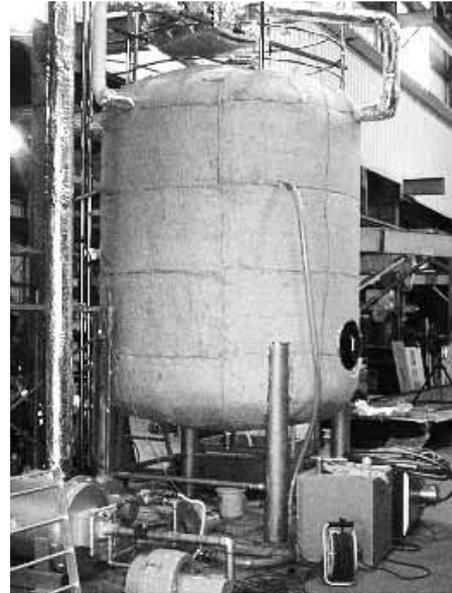


図14 装置全景



図15 得られた粉体

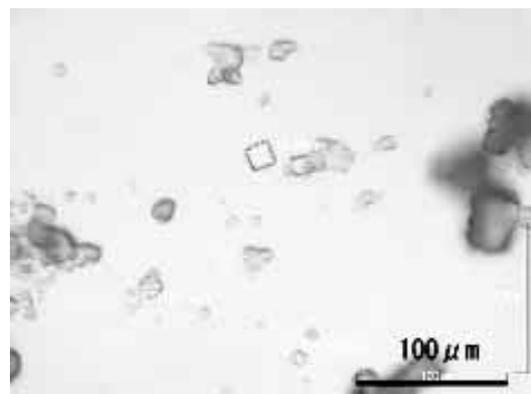


図16 粉体の顕微鏡写真

実験により得られた粉体を図15、その顕微鏡写真を図16に示す。得られた粉体は、現在、ベンチャー高安衛で作られているものと比較すると、結晶粒子が互いに固まったような状態が多く見られたが、結晶の大きさは、約8～20μmとほぼ同程度であることが確認された。

## 7 おわりに

開発した装置は、ノズル式噴霧乾燥機の弱点であるノズルの目詰まりが無いこと、乾燥チャンバ内で作られた粉体を再び処理液槽に戻す循環式システムであることが、大きな特徴であるが、現段階では不純物の少ない液体の気化に成功したところである。今後、本来の目的である高粘性或いは不純物を含む液体の処理を行いたい。

装置開発の過程で使用した熱流動解析は、現状では温度分布などの解析結果が実際の現象と異なる部分も多いことから、定性的に現象を把握するための方法として使用しているが、熱風吹き込み方法の最適化や、噴霧粒子の飛跡予測を行う上で有効な手段であったと考えている。今後は更に解析精度を上げ、定量的な現象の把握に努めたい。

## 8 謝辞

本研究は平成16年度沖縄産学官共同研究推進事業において行われたものであり、管理法人である南西地域産業活性化センターの新城裕一氏に感謝致します。

## 9 参考文献

- 1) S.A Moris and A.J. Alexander " An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems " J. Fluid Mech 55(2) 193-208 (1972.9)
- 2) Arun S.Mujumdar " Handbook of Industrial Drying " Marcel Dekker, Inc
- 3) 桐栄良三 「乾燥装置」日刊工業新聞社 (1966.6)
- 4) W.E.Ranz and W.R.Marshall, Jr "Evaporation from Drops Part I" Chem.Eng 48(3) 141-146 (1952.3)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。