

# 塩安の連続塩析結晶槽に関する数学的考察

青 木 勝 弥  
若 狭 秀 一  
迫 村 寿 男

## A Mathematical Study of Continuous Salting out Crystallization of Ammonium Chloride

Katsuya Aoki  
Hideichi Wakasa  
Toshio Sakomura

In connection with the dual production process manufacture of soda ash and ammonium chloride crystals which are suitable for use as a fertilizer, a mathematical study was undertaken as to the distribution of solid salt and supersaturation degrees of ammonium chloride in an idealized fluid state in operation in a continuous salting out crystallizer, which is akin to Krystal-type crystallizer.

The study showed that it is necessary to have the crystallizer so constructed as to produce strong up and down agitation and mixing and, at the same time, to have the unsaturation degree of salt under well-controlled state in order to obtain satisfactory crystals efficiently.

### 1. まえがき

アンモニア・ソーダ法における重曹分離母液から、塩化アンモニウムを回収する試みは古くから行われ、その方法には蒸発濃縮法と冷却塩析法とがある。我が国においては後者の方法が工業化され、肥料用塩安として現在その発展段階に入っている。肥料用塩安は、従来粉状塩安を製造し、これを成型して粒状としていた。しかし、その硬さ、形状、固結性および取扱いなどの点から、この成型品よりすぐれた単一結晶としての結晶塩安の要求が高くなって来た。

結晶そうに関しては、1940年に H. Svanoe<sup>1)</sup> が Krystal-type の連続結晶そうについて述べている。又、1947年に P. Millerと W. C. Saeman<sup>2)</sup> が硝安結晶の製造について Krystal-type の結晶そうの応用性の研究を行い Krystal-type の連続分級結晶そうの理論的解析を行なっている。その他結晶そうに関する文献は最近比較的多いが、これらの結晶そうは硫安、硝安その他の塩類に関するものである。塩安・ソーダ連産法における塩安の晶出には冷却操作と塩析操作とが必要であり、塩析による結晶そうについてはほとんど報告されていない。

筆者らは塩安の連続塩析結晶そうによる肥料用結晶

塩安製造の研究を企てた。塩安の結晶化に必要なデータの測定を行い、理想化された流動状態の結晶の流動層における結晶成長の数学的解析を行なった。

ここに、塩安の塩析による結晶化に関して、理想化された流動状態の連続結晶そうについての数学的解析の結果を記す。

### 2. 計算の仮定

塩安の連続塩析結晶そうは、そのそう内に塩安について飽和、食塩についてほとんど飽和の溶液中に塩安結晶を多量に懸吊させ流動層を形成せしめ、それに原液およびそれに相当する固形食塩を供給して、固形食塩の溶解により流動層内で塩安の過飽和度を生成させ、そこに存在する塩安結晶を成長せしめるものである。Fig. 1 に示すような Krystal-type の結晶そうを考え、その上ズミ液を循環ポンプで結晶そう底部に循環パイプを通して大量に循環せしめる。原液は循環ポンプの吸入側に供給する。したがって、循環液は食塩の不飽和度がそう内液よりわずかに大となる。一方この原液量に相当する固形食塩をそう底部に供給してそう液の食塩不飽和度を調節する。このことは食塩の溶解速度を調節することになり、ひいては発生する塩安の過飽和度を制御することになる。

この塩析結晶そう内で発生吸収される塩安の過飽和度は Krystal-type の結晶そうのようにそう外で発生せしめた過飽和液をそう内に導入するものでなく、その表示が困難である。便宜上、外部過飽和発生式と同様に生産量を循環量で割った値 ( $S'=P/G$ ) を見掛過飽和度と呼ぶことにする。これは勿論真の過飽和度を示すものではなく、真の値は結晶そうの構造、流動層の状態および固形食塩の分散溶解状況により異なるものである。

次の理想化された仮定によつて流動層内の固形食塩の分布および真の過飽和度分布の数学的検討を行なつた。この計算の仮定は次のとおりである。

- (1) 循環液は流動層内を上下のかくはんなく結晶そう底部より一様な速度  $v$  で上昇する。
- (2) 固形食塩はそう内液と同一速度で上昇する。
- (3) 供給される固形食塩の粒径は同一で、各粒子は同一条件で溶解する。
- (4) 固形食塩は流動層内を上昇する間に完全に溶解する。
- (5) 流動層の各高さにおける断面では同一条件とする。
- (6) 塩安の核発生による過飽和度の変化は無視できるほど小さいとする。
- (7) 流動層は塩安結晶に関して均一なものとする。

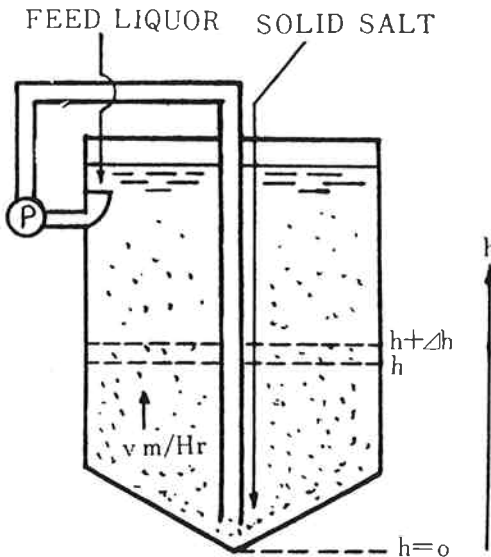


Fig. 1 Continuous salting out crystallizer for ammonium chloride.

### 3. 流動層内の固形食塩の分布

#### 〔1〕 式の誘導

流動層の任意の高さ  $h$  において、微小部分  $\Delta h$  を考えると (Fig. 1), 物質収支より

$$m_{(h)} v \Delta t - m_{(h+\Delta h)} v \Delta t = -A \cdot \Delta h \frac{dm}{dt} \cdot \Delta t$$

したがつて

$$-dm/dh \cdot \Delta h v \Delta t = -\Delta h \cdot dm/dt \cdot \Delta t$$

これを整理して

$$v \cdot dm/dh = dm/dt \quad (1)$$

を得る。一方、固形食塩の溶解速度式は

$$dm/dt = -Kac \quad (2)$$

であらわされる。(1), (2)式より

$$v \cdot dm/dh = -Kac \quad (3)$$

又、固形食塩粒子の表面積および重量は次式であらわされる。

$$a = n\phi_1 \ell^2, \quad m = n\phi_2 \ell^3 \rho$$

流動層内の液の食塩の不飽和度  $c$  は

$$c = c_0 - (m_0 - m) = m + (c_0 - m_0)$$

ここで、 $m_0 = n\phi_2 \ell_0^3 \rho$

これらの関係を(3)式に代入して、 $a$ 、 $c$  および  $n$  を消去すると、

$$v \cdot \frac{dm}{dh} = -\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right) \frac{K}{\rho} \frac{1}{\ell_0} m_0^{\frac{1}{3}} m^{\frac{2}{3}} \{m + (c_0 - m_0)\} \quad (4)$$

ここで、簡単のため、

$$\Phi = \frac{\phi_1}{\phi_2} \frac{K}{\rho} \frac{1}{\ell_0} m_0^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

とおくと、(4)式は

$$v \cdot \frac{dm}{dh} = -\Phi (c_0 - m_0) m^{\frac{2}{3}} \left\{1 + \frac{m}{c_0 - m_0}\right\}$$

したがつて、

$$-\frac{\Phi (c_0 - m_0)}{v} dh = m^{-\frac{2}{3}} \left\{1 + \frac{m}{c_0 - m_0}\right\}^{-1} dm \quad (6)$$

ここで、 $m/(c_0 - m_0) < m_0/(c_0 - m_0) < 1$  の条件では、 $\{1 + m/(c_0 - m_0)\}^{-1}$  が有限な級数に展開できるので、簡単に積分できる。すなわち

$$\left(1 + \frac{m}{c_0 - m_0}\right)^{-1} = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{-m}{c_0 - m_0}\right)^i$$

であるから、(6)式は

$$-\frac{\Phi (c_0 - m_0)}{v} dh = m^{-\frac{2}{3}} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{-m}{c_0 - m_0}\right)^i dm \quad (7)$$

となる。(7)式を積分して

$$-\frac{\Phi (c_0 - m_0)}{v} h + C = \int_{m_0}^m \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \frac{m^{i-\frac{2}{3}}}{(c_0 - m_0)^i} dm \quad (8)$$

$C$  は積分定数。 $h=0$  で  $m=m_0$  なるゆえ

$$\frac{\Phi (c_0 - m_0)}{v} h = f(m_0) - f(m) \quad (9)$$

が得られる。

ここで、

$$f(m) = \int_{i=0}^{M_0} (-1)^i \frac{m^{i-\frac{2}{3}}}{(c_0-m_0)^i} dm$$

$f(m)$  が計算できれば、 $h$  と  $m$  の関係すなわち流動層内の固形食塩の分布を求めることができる。

$$f(m) = \int_{i=0}^{M_0} (-1)^i \frac{m^{i-\frac{2}{3}}}{(c_0-m_0)^i} dm = \sum_{i=0}^{M_0} \left( \frac{-1}{c_0-m_0} \right)^i \frac{3}{3i+1} m^{\frac{3i+1}{3}}$$

であるから、これを(9)式に代入して、

$$h = \frac{v}{\phi(c_0-m_0)} \left[ \sum_{i=0}^{M_0} \left( \frac{-1}{c_0-m_0} \right)^i \frac{3}{3i+1} m_0^{\frac{3i+1}{3}} - \sum_{i=0}^{M_0} \left( \frac{-1}{c_0-m_0} \right)^i \frac{3}{3i+1} m^{\frac{3i+1}{3}} \right] \quad (10)$$

を得る。これが流動層内の固形食塩分布を示す式である。

〔2〕数値計算

(10)式による固形食塩分布の数値計算の条件を次のようにおく。

- 生産量  $P = 30 \text{ kg/hr.}$
- 循環量  $G = 30 \text{ m}^3/\text{hr.}$
- 見掛過飽和度  $S' = 1.0 \text{ kg/m}^3$
- 流動層内の液上昇流速  $v = 41 \text{ m/hr.}$
- 流動層の塩安結晶濃度  $= 425 \text{ kg/m}^3$
- 添加固形食塩の粒径  $\ell_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  および  $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$
- 残留食塩不飽和度  $\Delta c = 2.925 \text{ kg/m}^3 (= 0.05 \text{ mol/l})$  および  $5.85 \text{ kg/m}^3 (= 0.10 \text{ mol/l})$

結晶その温度を $10^\circ\text{C}$ とし、飽和温度 $5^\circ\text{C}$ の塩安原液を供給したとすると、塩析による塩安析出量はその溶解度特性より、食塩溶解量の約55mol%に相当するから、固形食塩の供給量 $M$ は

$$M = 58.5 / (53.5 \times 0.55) \cdot P = 1.989 \times (GS')$$

又、 $m_0 = M/G$  と考えられるから、

$$m_0 = 1.989S'$$

固形食塩は流動層内を上昇する間に、完全に溶解するから、残留食塩不飽和度は

$$\Delta c = c_0 - m_0$$

したがって、(10)式は次のように書きかえられる。

$$h = \frac{v}{\phi \cdot \Delta c} \left[ \sum_{i=0}^{M_0} \left( \frac{-1}{\Delta c} \right)^i \frac{3}{3i+1} (1.989 \cdot S')^{\frac{3i+1}{3}} - \sum_{i=0}^{M_0} \left( \frac{-1}{\Delta c} \right)^i \frac{3}{3i+1} m^{\frac{3i+1}{3}} \right] \quad (11)$$

(5)式において、固形食塩を立方体とすれば、 $\phi_1 = 6$ 、 $\phi_2 = 1$ 。食塩の溶解速度恒数は筆者らの測定にて $0.122 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr} (\text{kg/m}^3)$ を得た。 $\rho = 2,160 \text{ kg/m}^3$ である

から、 $\ell_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  のとき

$$\phi = 6 \left( \frac{0.122}{2,160} \right) \left( \frac{1}{0.2 \times 10^{-3}} \right) (1.989)^{\frac{1}{3}} = 2.13$$

$\ell_0 = 0.1 \times 10^{-3}$  のとき、 $\phi = 4.26$

となる。

以上の条件で(11)式により  $h$  と  $m$  の関係を計算すると、Fig. 2 のようになる。

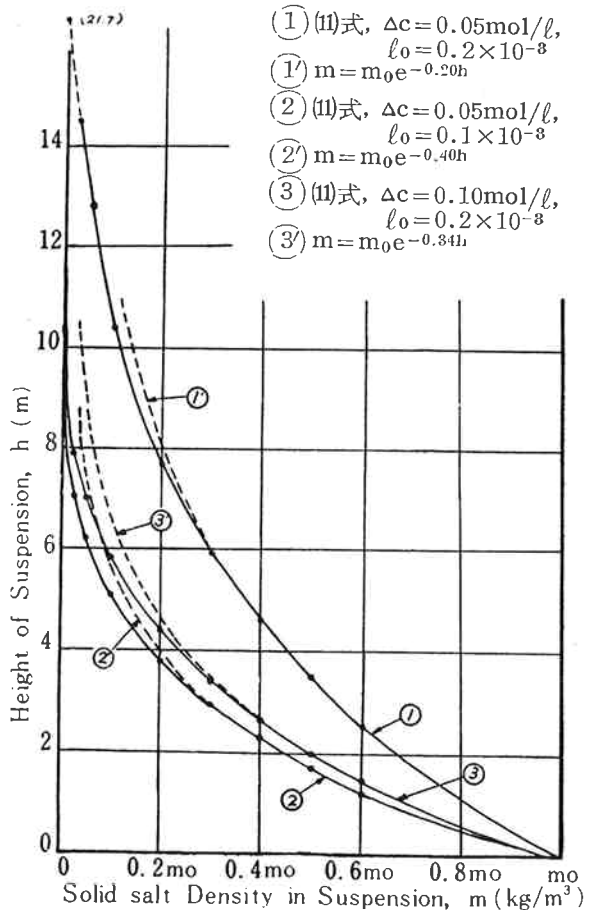


Fig. 2 Distribution of solid salt in suspension.

4. 流動層内の塩安過飽和度の分布

〔1〕式の誘導

流動層内の過飽和度の変化速度は、

$$\text{過飽和度の変化速度} = (\text{食塩の溶解速度}) - (\text{塩安結晶の成長速度}) - (\text{塩安の核発生速度})$$

であるから、塩安の核発生による過飽和度の変化は無視できるほど小さいとすると、

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha \frac{dm}{dt} - \frac{dm'}{dt} \quad (12)$$

ここで、 $\alpha$ は固形食塩の溶解量とそれに相当する塩安析出量との比である。塩安結晶の成長速度式は

$$\frac{dm'}{dt} = K'a'S \quad (13)$$

であらわされる。固形食塩分布に関する(1)式と同様に

して、塩安過飽和度分布についても

$$\frac{dS}{dt} = v \frac{dS}{dh} \quad (14)$$

を得る。(1), (12), (13)および(14)式より

$$v \frac{dS}{dh} = -\alpha v \frac{dm}{dh} - K'a'S$$

これを整理して、

$$\frac{dS}{dh} + \frac{K'a'}{v} S = -\alpha \frac{dm}{dh} \quad (15)$$

を得る。

まず、(15)式を基礎にして流動層内を平均化したものについて考えてみる。(15)式を  $h$  について  $h=0$  から流動層の全高  $H$  まで積分すると

$$\int_0^H dS + \int_0^H \frac{K'a'}{v} S dh = -\int_0^H \alpha \cdot dm$$

$$\therefore S(H) - S(0) + \frac{K'a'}{v} \int_0^H S \cdot dh = -\alpha \{m(H) - m(0)\}$$

したがって、

$$\int_0^H S dh = \frac{v}{K'a'} \left[ \alpha \{m(0) - m(H)\} + \{S(0) - S(H)\} \right]$$

$$\text{ここで、} \frac{1}{H} \int_0^H S dh = \bar{S}$$

とすると、 $\bar{S}$  は流動層内の過飽和度の平均値である。

$$\bar{S} = \frac{vA}{K'a'HA} \left[ \alpha \{m(0) - m(H)\} + \{S(0) - S(H)\} \right] \quad (16)$$

となる。ここで、 $a'HA = a_T'$  は流動層内の塩安結晶の全表面積であり、 $\alpha \{m(0) - m(H)\}$  は流動層単位容積当りの食塩の溶解量を塩安換算したものである。又、 $[\alpha \{m(0) - m(H)\} + S(0)] - S(H)$  は流動層単位容積当りの塩安成長量である。したがって、塩安結晶の生産量  $P$  は

$$P = vA [\alpha \{m(0) - m(H)\} + \{S(0) - S(H)\}]$$

となる。ゆえに(16)式は次のように書きかえられる。

$$\bar{S} = P/K'a_T'$$

$$\therefore P = K'a_T' \bar{S} \quad (17)$$

(17)式は、塩安結晶の成長速度を流動層内で平均化したものである。したがって、(15)式を  $h$  について積分すれば、流動層内の塩安の過飽和度  $S$  の分布を知ることができる。一方

$$\int_0^H S dh = H \bar{S} = \frac{1}{K'a'} \times \frac{P}{A} \quad (18)$$

であるから、(18)式の左辺は流動層内の単位断面積当りの生産量を代表するものであり、生産量が決まれば一定となる。

(15)式より、 $S$  と  $h$  の関係を求める。先に(11)式より流動層内の固形食塩の分布  $m-h$  の関係を求めたが、Fig. 2 より  $m-h$  の関係を計算可能な近似式で求めると、

$$m = m_0 e^{\beta h} \quad (19)$$

で近似できる。したがって

$$dm/dh = m_0 \beta e^{\beta h} \quad (20)$$

(15), (20)式より

$$\frac{dS}{dh} + \frac{K'a'}{v} S = -\alpha m_0 \beta e^{\beta h} \quad (21)$$

が得られる。

$$K'a'/v = b \quad (22)$$

とおき、(21)式の解を求めると、

$$S = e^{-bh} \left\{ -\frac{\alpha m_0 \beta}{b + \beta} e^{(b + \beta)h} + C \right\}$$

$C$  は積分定数。 $h=0$  で、 $S=S_0$  とすると、

$$C = \frac{\alpha m_0 \beta}{b + \beta} + S_0$$

したがって、

$$S = -\frac{\alpha m_0 \beta}{b + \beta} (e^{\beta h} - e^{-bh}) + S_0 e^{-bh} \quad (23)$$

が得られる。(23)式は  $S$  の分布曲線を示す式である。(23)式において、塩安の残存過飽和度が無視できるほど小さいとすると、 $S_0 \approx 0$  であり、 $e^{-bh} < 1$  なるゆえ  $S_0 e^{-bh} \approx 0$  である。したがって、(23)式は、

$$S \approx -\frac{\alpha m_0 \beta}{b + \beta} (e^{\beta h} - e^{-bh}) \quad (23')$$

となる。

## [2] 数値計算

(23') 式により数値計算を行う。計算の条件は固形食塩の分布に関するときと同一におき、流動層内の塩安結晶の平均粒径 1.1mm とする。

### (1) $\beta$ の決定

(11)式において求められた  $m$ ,  $h$  の各値を(19)式に代入して  $\beta$  を求めると、 $\Delta c = 0.05 \text{ mol/l}$  に対し、 $l_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  のとき  $\beta = -0.20$ ,  $l_0 = 0.1 \times 10^{-3}$  のとき  $\beta = -0.40$ ,  $\Delta c = 0.10 \text{ mol/l}$  に対し、 $l_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  のとき  $\beta = -0.34$  を得る。すなわち、固形食塩分布に関する近似式は

$$\Delta c = 0.05 \text{ mol/l} \begin{cases} l_0 = 0.2 \times 10^{-3} \text{ のとき} \\ l_0 = 0.1 \times 10^{-3} \text{ のとき} \end{cases} \begin{cases} m = m_0 e^{-0.20h} \\ m = m_0 e^{-0.40h} \end{cases}$$

$\Delta c = 0.10 \text{ mol/l}$ ,  $l_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  のとき  $m = m_0 e^{-0.34h}$

である。この曲線を Fig. 2 に破線で示した。

### (2) $b$ の決定

塩安結晶の成長速度恒数  $K'$  は筆者らの測定にて  $3.0 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \text{ hr}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) を得た。

$$a' = (425)(6)/(1.1 \times 10^{-3} \times 1,530)$$

$$=1.51 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

であるから、

$$b = K'a'/v = (3.0 \times 10^{-2})(1.51 \times 10^3)/(41) = 1.11$$

を得る。この場合、 $a'$  が全部有効に作用するかどうか問題で、実際には流動層の効率を考える必要があるが、仮りに100%とし、 $b=1.11$  とする。

(3)  $m_0$

$$S' = 1.0 \text{ kg/m}^3 \text{ であるから, } m_0 = 1.989 \text{ kg/m}^3$$

(4)  $\alpha$

塩析による塩安析出量は食塩溶解量の約 55mol % に相当するから

$$\alpha = 0.55(53.5/58.5) = 0.503$$

上の値を (23') 式に代入して、 $S$  と  $h$  の関係を求めると Fig. 3 に示すようになる。

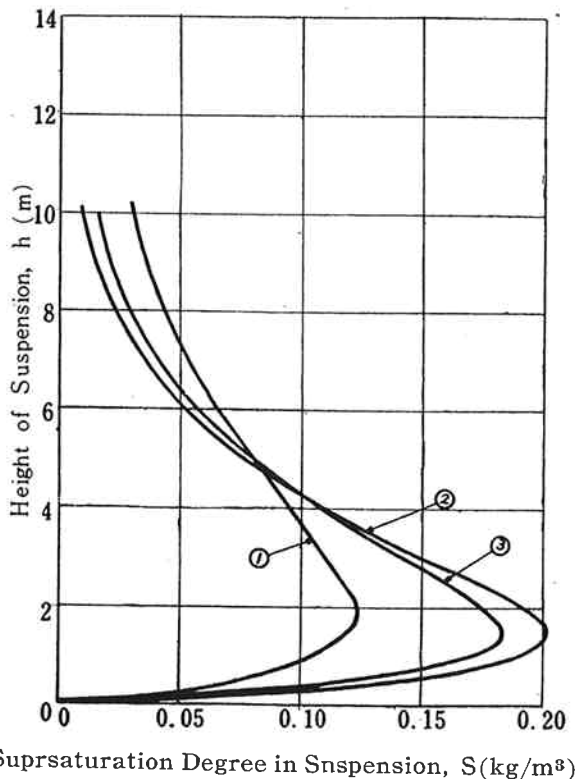


Fig. 3 Distribution of supersaturation degree in suspension.

$$(23') \text{ 式} \begin{cases} \textcircled{1} \Delta c = 0.05 \text{ mol/l, } l_0 = 0.2 \times 10^{-3} \\ \textcircled{2} \Delta c = 0.05 \text{ mol/l, } l_0 = 0.1 \times 10^{-3} \\ \textcircled{3} \Delta c = 0.10 \text{ mol/l, } l_0 = 0.2 \times 10^{-3} \end{cases}$$

### 5. 考 察

理想化された流動状態の流動層に関して、固形食塩の分布と塩安過飽和度分布の計算を行なったが、Fig. 2, 3 および(10), (23)式より連続塩析結晶槽による結晶塩安製造についてのいくつかの重要な結論を得ることができる。流動層内において、食塩の溶解を十

分に行うためには、 $m_0/\Delta c < 1$  で、これを小さくする必要がある。 $m_0/\Delta c$  は  $S'/\Delta c$  と比例関係にあるので、食塩粒径が一定の場合  $S'/\Delta c$  が食塩溶解に関するパラメーターと考えられる。食塩溶解の面からは  $S'/\Delta c$  が小さいほど有利である。又添加食塩の粒径  $l_0$  が小さいほど有利である。しかし、この場合、食塩の急速な溶解によつて Fig. 3 に示すように、 $\Delta c$  が大、 $l_0$  が小なるほど流動層内の塩安の過飽和度  $S$  のピークが大となり、しかも流動層低部にかたよつて結晶成長の面から不利となる。生産量  $P = G \cdot S'$  で循環量  $G$  は実際には常に最高値をとるべきであるから、 $S'$  は生産量一定でこれを小さくすることはできない。 $l_0$  は塩安過飽和分布の面からは大きい方がよいが、その完全溶解のために必要な流動層高さはますます高くなり、又一定の  $\Delta c$  において層内の固形食塩濃度が大きくなつて不都合である。

結晶成長の面から、たとえば  $l_0 = 0.2 \times 10^{-3}$  のとき  $\Delta c = 0.05 \text{ mol/l}$  必要だとすると、この場合、食塩の完全溶解のためには 22m の流動層の高さが必要となる。しかし添加食塩はその50%は層高  $h = 3.6\text{m}$  以下において、75%は  $h = 6\text{m}$  以下において溶解する。塩安過飽和度のピークは  $h = 2\text{m}$  の位置にある。したがつて、食塩の十分な溶解のために流動層の高さを無暗に高くすることは好ましいことではない。それゆゑ、未溶解の食塩が循環系に幾分入ることは避けられないし、塩安の残留過飽和度もある程度存在することになる。したがつて  $S_0 = 0$  とはならない。

(18)式の左辺  $\int_0^{11} S dh$  は流動層単位断面積当りの生産量に比例するものであるから、 $S$  のピークは生産量が増加すれば当然大となる。流動層の効率、すなわち層内の塩安結晶が均一に分布しているかどうか、結晶面が有効に過飽和を吸収できるかどうかということも  $S$  のピークの値に影響するが、仮りにその効率を70%とすれば、 $S$  のピークは約25%高くなる。

### 6. むすび

循環液は流動層内を上下のかくはんなく一様な速度で上昇するという理想化された流動状態の流動層に関して、固形食塩と塩安過飽和度の分布の計算を行なった。この場合結晶成長のためによく制御された食塩不飽和度において、固形食塩が層内を上昇する間に完全に溶解するためには、非常に高い流動層が必要となる。しかし、食塩の溶解および塩安過飽和度のピークは層の低部にかたよつており、流動層として利率の悪いものである。

一定の生産量において満足な結晶を効率よく得るためには、塩安過飽和度分布のピークをこわし過飽和度

を流動層全体にわたって平均化せしめることが必要である。そのためには層内で食塩の溶解が均一におこるように、食塩の不飽和度をよく制御した状態で流動層が上下の激しいかくはんがおこるような結晶そうの構造にしなければならない。層の高さをあまり高くすることは不利であるから、残留過飽和度が存在し、又少量の未溶解塩が循環系に混入するからそう底においてもある程度の過飽和度があることになる。

## 7. 記号

A = 結晶そうの有効断面積,  $m^2$   
 a = 流動層内の固形食塩の表面積濃度,  $m^2/m^3$   
 a' = 流動層内の塩安結晶の表面積濃度,  $m^2/m^3$   
 a<sub>T</sub>' = 流動層内の塩安結晶の全表面積,  $m^2$   
 c = 流動層内の食塩の不飽和度,  $kg/m^3$   
 c<sub>0</sub> = 結晶そう底 (h=0) における食塩の不飽和度,  $kg/m^3$   
 Δc = 残留食塩不飽和度,  $kg/m^3$   
 G = そう液の循環量,  $m^3/hr.$   
 H = 流動層の全高, m  
 h = 流動層の高さ, m  
 K = 食塩の溶解速度恒数,  $kg/m^2hr.(kg/m^3)$   
 K' = 塩安結晶の成長速度恒数,  $kg/m^2hr.(kg/m^3)$

ℓ = 流動層内の固形食塩の粒子径, m  
 ℓ<sub>0</sub> = 添加固形食塩の粒子径, m  
 M = 固形食塩の供給量,  $kg/hr$   
 m = 流動層内の固形食塩濃度,  $kg/m^3$   
 m<sub>0</sub> = 結晶そう底 (h=0) における固形食塩濃度,  $kg/m^3$   
 m' = 流動層内の塩安結晶濃度,  $kg/m^3$   
 n = 固形食塩の粒子数, no./m<sup>3</sup>  
 P = 塩安結晶の生産量,  $kg/hr.$   
 S = 塩安の過飽和度,  $kg/m^3$   
 S<sub>0</sub> = 結晶そう底 (h=0) における塩安の過飽和度,  $kg/m^3$   
 S' = 塩安の見掛過飽和度 (=P/G),  $kg/m^3$   
 t = 時間  
 v = 流動層内の液上昇流速,  $m/hr.$   
 φ = 形状係数  
 ρ = 食塩の密度,  $kg/m^3$

## 8. 文献

- 1) Svanoe, H., Ind. Eng. Chem., 32, 636-39 (1940)
- 2) Saeman, W. C. and Miller, P., Chem. Eng. Progr., 43, 667-90 (1947)