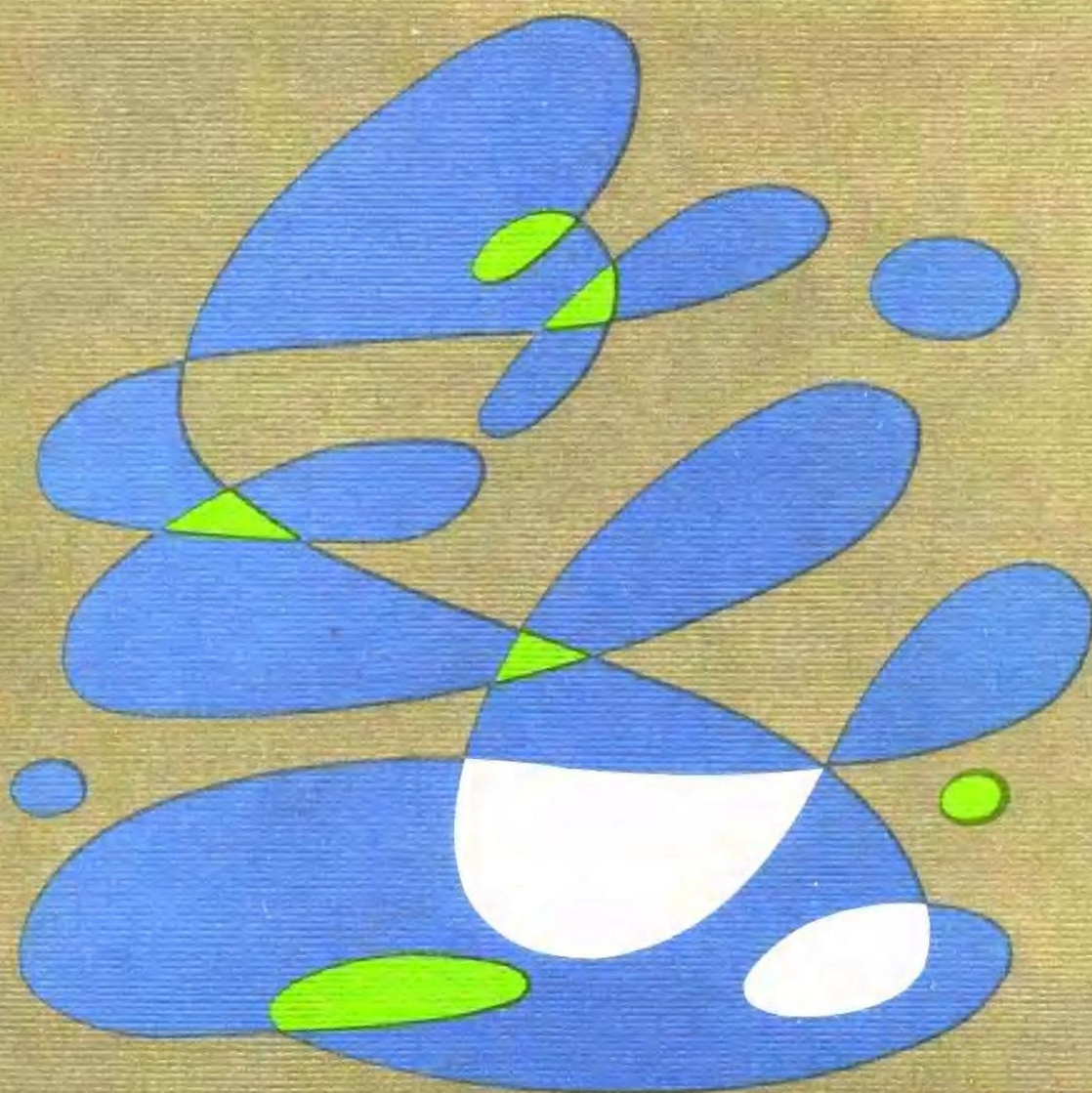


# 調温・調湿

工場操作シリーズ

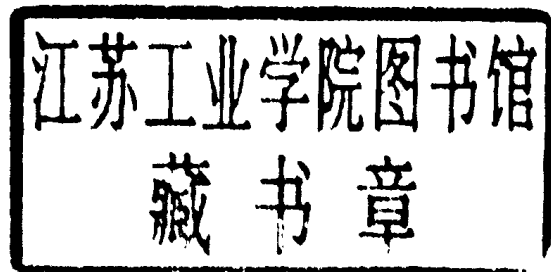
NO. 20



化学工業社

工場操作シリーズ

# 調 温 ・ 調 湿 編



株式会社 化学工業社

別冊 化学工業  
工場操作シリーズ（調温・調湿編）

定 価        1,300 円

送 料        100 円

昭和43年11月1日発行

---

編集兼発行人    原            徹  
印   刷   人    鈴 木 貞 三 郎  
印   刷   所    公 和 印 刷 株

—— 発 行 所 ——

株式会社    化 学 工 業 社

東京都千代田区神田淡路町1-11  
電 話 (253) 6 4 5 1～4  
振 替 東 京 1 3 0 6 0

# 工場操作シリーズ 調温・調湿編

## —目 次—

3k201/16

### 1. 最近の調温・調湿理論と動向

- 1.1 最近の調温・調湿理論と動向…………… 東京工業大学 稲 積 彦 二……………(1)

### 2. 調温・調湿装置の選定と設計要領

- 2.1 調温・調湿装置の選定と設計要領…………… 三機工業(株) 小 笠 原 祥 五……………(12)

### 3. 操作の実際例

- 3.1 醸造工場…………… 合同酒精(株) 浅 尾 鉄 三……………(32)
- 3.2 製菓工場…………… 森永製菓(株) 荒 谷 勲……………(41)
- 3.3 煙草工場…………… 日本専売公社 宮 内 永 和……………(51)
- 3.4 フ卵工場…………… (株)後藤卵卵場 石 川 宏……………(62)
- 3.5 光学レンズ工場…………… キヤノンカメラ(株) 塩 谷 珪 助……………(68)
- 3.6 火薬工場…………… 帝国火工品製造(株) 山 下 大 四 郎……………(74)
- 3.7 印刷工場…………… 凸版印刷(株) 渡 辺 大 之 輔……………(81)
- 3.8 繊維工場…………… 日東紡績(株) 木 下 義 男……………(88)
- 3.9 精密機械工場…………… 計量研究所 沢 辺 雅 二……………(100)
- 3.10 電気工業…………… ソニー(株) 高 田 五 郎……………(115)
- 3.11 園 芸…………… 園芸試験場 中 川 行 夫……………(126)
- 3.12 R I 実験室…………… 原子力研究所 伊 勢 幸 正……………(134)
- 3.13 写真フィルム…………… 小西六写真工業(株) 熊 谷 善 衛……………(147)
- 3.14 無じん室…………… (株)ダン科学 沼 田 典 之……………(155)

## <1. 最近の調湿・調湿理論と動向>

# 1.1 最近の調湿・調湿理論と動向

## 1. ま え が き

空気と水を接触させて、空気の湿度と温度を所要の条件に調整する操作を古くより調湿操作（時には調湿・調湿操作ともよばれる）とよばれてきたが、近年に至って種々の一般ガスまたは空気中に含まれる種々の蒸気の含有量と温度の調整を気-液接触操作によって行なう場合の計算がかなり合理的に行ないうるようになり、上述の調湿の範ちゆうは拡大された。

一般には工業的調湿操作は気-液接触操作によるほうが有利であるが、一方目的と条件によっては上述の範ちゆうにこだわらないで、他の原理による手法すなわち生蒸気または高湿ガスの混入による増湿、乾きガスまたは低湿ガスの混入による減湿、固体の化学吸収剤または吸着剤による減湿、液体吸湿剤による減湿、ガスの圧縮冷却による減湿あるいは冷却凝縮器による減湿などの諸操作のうちのいずれかによるのが適切である場合もあるから、あらかじめ十分に検討すべきである。

上記の諸操作のうちで現在比較的多く家際に利用されている固体吸着剤による減湿<sup>1,2)</sup>や冷却凝縮器による減湿<sup>3,4)</sup>については、それぞれ肩書きの文献に最近までの研究を紹介されているので、これらを参照していただくことにして、ここでは問題を古くから化学工学における単位操作の1部門として扱われている調湿の範ちゆうに限定して、気液の直接接触による調湿操作の解析法について述べる。

熱移動と物質移動が同事に起こる気-液接触操作の計算に関しては、Merkelの提案以来種々の方法が報告されており、ことに近年に至って一般ガス-液系についての研究が盛んになってきたが、これらの諸方法にはそれぞれ一長一短があるから、当面する目的条件とそれぞれの方法に含まれている仮定条件とを対照して、できるだけ両者が相容れる方法を選定する必要がある。

これらの方法の詳細および具体的運用については原報その他<sup>5,6)</sup>にゆずり、ここではこれらの基本的な考え方を述べて、その差異、特色を示すことにとどめる。

## 2. 不溶性ガスと純液との接触操作

熱移動と物質移動が同時起こる場合の計算においては、両者の移動速度を併せ考慮する必要があるので複雑になる。この種の計算法としてMerkel<sup>7)</sup>は空気-水系の場合に対していわゆるエンタルピー推進力の概念を用いて簡略化することを提案し、爾後のこの方面の研究の発展に有益な示唆

を与えた。

しかしながら、この方法は一般ガス-液系に対して適用できないだけでなく、空気-水系の場合においてもある程度湿度が高い場合には適用できず、また推進力として水と空気の本体温度にもとづく総括値を用いられているので、その一般性が低いという欠陥がある。

このような短所を補ない、より合理的な計算法を得る目的で、その後種々の方法が提案されているが、これらはその準拠している物理量または擬物理量によってつぎのように大別できる。すなわち

- i) 蒸気分圧による方法
- ii) 湿度による方法
- iii) エンタルピーによる方法
- iv) 擬エンタルピーによる方法
- v) 擬ポテンシャルによる方法
- vi) 有効エネルギーの差による方法

などが挙げられるが、調湿の分野に適用されているのは ii)～v) である。

## 2・1 向流接触操作

### 2・1・1 一般ガス-液系の場合

一般ガス-液系の向流接触操作の計算法については近年種々の方法が提出されているが、それぞれ一長一短があるから、前述のようにそれぞれの目的条件に応じて用いるべき方法を選定することが望ましい。

(1) 湿度による方法<sup>8,9)</sup>：ガス側の顕熱移動および物質移動の速度式、液側の伝熱速度式および気-液間のエンタルピー収支より得られる次式

$$(A+B)(t_i - t_L) = M(H - H_i) + N \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで} \quad A &= \frac{h_{La}}{k_{Ha}} \quad B = \frac{h_{Ga}}{k_{Ha}} \\ M &= r_0 + C_p t_G - C_L t_L \quad N = B(t_G - t_L) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\text{と平衡関係} \quad f(H_i, t_i) = 0 \quad (3)$$

とを用いると、装置の一端における式(1)中の  $A, B, M$  および  $N$  の値が既知であるから、式(1)を満足する  $H_i$  と  $t_i$  の関係は  $H$  対  $t$  座標上で直線となり、この図上に式(3)の平衡曲線を書いておけば、上述の直線との交点より気-液界面の状態  $(H_i, t_i)$  が求まる。

またガスの  $H$  対  $t$  座標上における状態変化を次式

$$\frac{dH}{dt_G} = \frac{H - H_i}{t_G - t_i^*} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで} \quad (t_G - t_i^*) &= (y-1)(t_G - t_i) \\ y &\equiv h_{Ga}/k_{Ha} \cdot C_H \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

によって求め、図解的に逐次ガスの  $H$  対  $t_G$  曲線を求めて計算を行なう方法である。近似仮定がほとんど含まれていないので精度は高い。

(2) エンタルピーによる方法：稲積<sup>5,6)</sup> は(1)の方法に 1, 2 の近似仮定を加えて、湿りガスのエ

ンタルピーを用いた方法を提案した。すなわち気液両側の伝熱速度式，ガス側の物質移動速度式およびエンタルピー収支より得られる次式

$$\frac{i_i - i}{t_i - t_L} = -\frac{h_{La}}{k_{Ha}} \phi \quad (6a)$$

ここで 
$$\phi = 1 - \left[ \frac{B(y-1)}{y^2} \right] \frac{dt_G}{di} \quad (7)$$

$$\frac{i_i - i}{t_i - t_G} = \frac{B(y-1)}{y} \frac{\phi}{1-\phi} \quad (8)$$

および平衡関係  $f(i_i, t_i) = 0$  を用いて気-液界面の状態  $(i_i, t_i)$  を求め，また  $i$  対  $t$  座標上におけるガスの状態変動の方向を次式

$$\frac{di}{dt_G} = \frac{1}{y} \frac{i_i - i}{t_i - t_G} + \frac{B(y-1)}{y^2} \quad (9a)$$

によって求め，図解的に逐次  $i$  対  $t_G$  曲線を求めて計算をする方法である。本法は(1)の計算精度と余り差異がない。

また Algermissen<sup>10)</sup> は Mollier 型線図によってガスのエンタルピー  $i$  と湿度  $H$  を用いて行なう図式解法を提案した。すなわち前述の方法と同様な基礎的關係を用いて得られる次式

$$C_H(t_i - t_L) = \frac{h_g}{h_G + h_L} \left[ C_H(t_G - t_L) + (H - H_i)(i_{vi} - i_{Li}) \frac{1}{y} \right] \quad (10)$$

によって気-液界面の状態  $(i_i, H_i, t_i)$  を求め， $i$  対  $H$  座標におけるガスの状態変化の方向を次式

$$\frac{di}{dH} = y C_H \frac{(t_G - t_i)}{(H - H_i)} + i_{vi} \quad (11)$$

によって求め，図解的に  $i$  対  $H$  曲線を求めて計算する方法であるが，(2)の方法に比べて図解法が煩雑である。

(3) 擬エンタルピーによる方法：水科ら<sup>11)</sup>は湿りガスのエンタルピー  $i'$  を次式

$$i' = y C_H t_G + r_0 H \quad (12)$$

で定義し，気-液界面の状態を前述の場合と同様にして得られる次式

$$\frac{i'_i - i'}{t_i - t_L} = -y C_H \frac{h_{La}}{h_{Ga}} \quad (13)$$

と擬飽和エンタルピー曲線 ( $i'_i$  対  $t_G$ ) によって求め， $i$  対  $t_G$  座標上におけるガスの状態変化の方向を次式

$$\frac{di}{dt_G} = \frac{1}{y} \frac{i'_i - i'}{t_G - t_i} \quad (14)$$

によって求め，図解的に逐次  $i$  対  $t_G$  曲線を求めて行なう計算法である。

式(12)～(14)中の  $y$  は  $h_{Ga}/k_{Ha} \cdot C_H = B/C_H$  であるが， $B$  の値は系の種類によってほとんど一定であるので， $y$  は大約湿度  $H$  だけの関数である。本法は  $y$  の値を系の種類による定数であるという近似仮定を含んでいることに留意する必要がある。

水科ら<sup>12)</sup>はその後蒸気分圧が著しく変化する場合の計算法として，ガスの湿り比熱  $C_H$  とガス側伝熱係数  $h_G$  を蒸気温度の関数として取り扱う場合の計算法を提案している。

また Lewis ら<sup>13)</sup>は湿りガスの擬エンタルピーを次式

$$i' = C_H t_G + r' H \quad (15)$$

ここで

$$r' = \frac{r_0}{y \cdot f} \quad f = \frac{a_H}{a_M} \quad (16)$$

で定義し、気-液界面の状態を前述の方法と同様にして次式と擬飽和エンタルピー曲線 ( $i'_i$  対  $t_G$  曲線) によって求め、

$$\frac{i'_i - i'}{t_i - t_L} = - \frac{h_L a_H}{y k_{H a_M}} \quad (17)$$

$i'$  対  $t_G$  座標上におけるガスの状態変化を次式

$$\frac{di'}{dt_G} = \frac{i'_i - i'}{t_i - t_G} \quad (18)$$

で求めて、逐次図解的にガスの状態変化曲線 ( $i'$  対  $t_G$ ) を求めて計算する方法を提案しているが、 $y$  の値は水科らと同様に系による定数として扱っている。

(4) 擬ポテンシャルによる方法：Cribb ら<sup>14)</sup>は石炭ガスの増湿操作の計算を行なう自的で、高温度における物質移動速度を次式で表わすことにし

$$G' dH' = k_H' a_s (\alpha'_i H'_i - \alpha H') dz \quad (19)$$

ここで

$$\alpha' = \frac{\ln P / (P - p)}{p / (P - p)} \quad (20)$$

またエンタルピー移動の擬ポテンシャルを次式

$$\theta = \frac{h_G}{k'_H} (t_G - t_0) + \alpha' r_i H' \quad (21)$$

で定義して、エンタルピー移動速度を次式

$$G' di^* = k_H a_s (\theta_i - \theta) dz \quad (22)$$

によって表わし、気-液界面の状態を次式

$$\frac{\theta_i - \theta}{t_i - t_L} = - \frac{h_L}{k'_H} \quad (23)$$

と  $\theta_i$  対  $t_G$  曲線によって求め、ガスのエンタルピー  $i^*$  [kcal/S. G. V.] 対  $t_G$  座標上における状態変化の方向を次式

$$\frac{di^*}{dt_G} = \frac{k_H' C_H'}{h_G} \frac{\theta_i - \theta}{t_i - t_G} \quad (24)$$

によって求めて、図解的に逐次  $i^*$  対  $t_G$  曲線を求めて計算を行なう方法である。

このほかに擬ポテンシャルを用いた計算法としては Huldén<sup>15)</sup> の“温度の次元をもつ見かけの総伝熱ポテンシャル”による1成分の冷却凝縮操作の計算法や Porter ら<sup>16)</sup> の Huldén の提案による擬ポテンシャルを修正したものを用いる2成分蒸気の冷却凝縮操作の計算法の提案がある。

また Votta ら<sup>17)</sup> は温度の次元をもつ有効エネルギーの差を推進力として用いて冷却凝縮操作を計算する方法を提案しているが、この方法の実用性については未知数が残されている。

## 2・1・2 空気-水系の場合<sup>18,19)</sup>

空気-水系の接触操作の場合には近似的に Lewis の関係が成り立つので、式(6a), (7)および(9a)

において  $y=1$  とおくと、式(7)で  $\phi=1$  となり、これらの関係はそれぞれつぎのようになる。

$$\frac{i_i - i}{t_i - t_L} = -\frac{h_L a}{k_H a} \quad (6b)$$

$$\frac{di}{dt_G} = \frac{i_i - i}{t_i - t_G} \quad (9b)$$

したがって、この場合の計算は一般ガス-液系の場合に比べてかなり簡単になるが、この系の場合でも湿度  $H=0\sim 0.20$  に対して  $y=1.1\sim 0.8$  程度となり、 $H=0.4$  では  $y=0.6$  程度となって、Lewis の関係からかなりはずれるから、目的条件によってはこの系の場合でも一般ガス-液系の計算法による必要があり、さらに前述の水科<sup>11,12)</sup> や Lewis ら<sup>13)</sup> の方法で用いられている  $y$ =一定とする仮定を含まない計算法<sup>5,6,8,9)</sup>による必要がある。

## 2.2 十字流接触操作

十字流気-液接触操作は実際面においてはかなり古くから利用されているが、その基礎的研究はきわめて少なく、いまのところ一般ガス-液系については等液温操作以外の場合の合理的計算法は得られていない。空気-水系の場合でもごく最近までは水冷却操作の総括的近似計算法が知られていた程度である。

### 2.2.1 一般ガス-液系の場合<sup>5)</sup>

この場合の一般的計算法はいまのところ明らかにされていないが、等液温増湿操作すなわち液を装置内へ循環させ、ガスを適当な温度まで加熱して装置内へ導入し、液と接触させて冷却増湿する操作を行なう場合には、十字流接触操作の場合にも装置内を通じて液温は均一になり、かつ式(25)で与えられる平衡操作温度  $t_E$  になる。

$$\frac{H_E - H}{t_G - t_E} = \frac{(h_G a / k_H a)}{r_E + C_v(t_G - t_E)} \quad (25)$$

ここで  $H_E$  および  $r_E$  はそれぞれ温度  $t_E$  における飽和湿度および循環液の蒸発潜熱である。

またこの種の操作を行なうための装置の所要長さ  $x_0$  は次式によって求められる。

$$\ln \frac{H_E - H_1}{H_E - H_2} = \frac{k_H a}{G} x_0 \quad (26)$$

$$\text{または} \quad \ln \frac{t_{G1} - t_E}{t_{G2} - t_E} = \frac{h_G a}{G C_{Hav}} x_0 \quad (27)$$

向流接触操作における等液温増湿についてはすでに周知のことであるので省略したが、十字流接触によるガスの冷却増湿操作はその設計計算が可能であり、また今後有効に利用される余地が残されていると考えるので、ここにあえて取りあげた次第である。

### 2.2.2 空気-水系の場合

この場合についても上述の等液温増湿操作は従来ほとんど活用されていない向きであるが、今後その効果的な利用を検討すべきである。この場合の計算は式(25)~(26)によればよい。

つぎに水温が変化する場合については、近年 Zivi ら<sup>20)</sup> が総活エンタルピー移動容量係数にもとづいて計算した計算線図による十字流冷水塔の近似計算法を提出しているが、この方法の適用条件が特定の入口水温と入口空気の湿球温度の場合に限定され、適用可能な水温の範囲が狭いので、

Schechter ら<sup>21)</sup> はさらに広範囲の条件に適用できるようにその改良を試みた。すなわち塔内の微小要素におけるエンタルピー収支式

$$-\frac{\partial t_L}{\partial z}\bigg|_x = \left(\frac{G}{LC_L}\right) \frac{\partial i}{\partial x}\bigg|_z \quad (28)$$

と空気のエンタルピー変化速度を表わす次式

$$\frac{\partial i}{\partial x}\bigg|_z = Ka(i_L - i) \quad (29)$$

においてつぎのような置換を行ない、

$$\left. \begin{aligned} Z &= 0.045Ka i_{Le} z / LC_L \\ X &= Kax / G \\ I &= i / i_{Le} \quad I_e = i_1 / i_{Le} \\ V &= 0.045(t_L - t_{Le}) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

また温度  $t_L$  と飽和空気のエンタルピー  $i_L$  との関係が、 $t_L = 4 \sim 54^\circ\text{C}$  の範囲に対して次式

$$i_L = 0.555 \exp(2.57 + 0.045t_L) \quad (31)$$

で表わされるものとして次式を導き、

$$\frac{\partial I}{\partial X}\bigg|_z = -\frac{\partial V}{\partial Z}\bigg|_x = e^V - I \quad (32)$$

これを境界条件

$$\left. \begin{aligned} Z=0 \text{ において } V &= 0 \\ X=0 \text{ において } I &= I_e \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

のもとで、デジタルコンピューターによって数値計算を行ない、 $I_e = 0.125 \sim 0.75$  の範囲で5種の  $I_e$  について、 $X$  をパラメーターとし、 $Z$  を横軸として共用して、 $-V$  対  $Z$  および  $I$  対  $Z$  を点綴した計算線図を提出した。

この計算法によって計算を行なうためには、目的の操作の  $t_L$  が  $4 \sim 54^\circ\text{C}$  であること、 $I_e$  および  $X$  の値が大むね線図の作製条件と合致している必要があり、両者の間の差異がかなり見られる場合には改めて線図を作製する必要がある。またこの方法の大きい欠点と考えられることは、 $-I$  対  $Z$  曲線および  $I$  対  $Z$  曲線はいずれも  $Z$  が小さい範囲と大きい範囲においてはかなり急激な変化をするので、計算精度がかなり低下するおそれがある。

稲積ら<sup>22)</sup>は十字流冷水塔の計算をデジタルコンピューターに依存しないで、個々の条件に応じて式28および29の関係にもとづいて、塔内における空気エンタルピーと水温の分布を図解的に求め、これによって設計計算を行なう方法を提案した。

上記の方法に含まれる近似仮定は少ないので、その計算精度は比較的良好と考えられるが、図解の手続きは幾分煩雑であるので、比較的時間内にある程度の精度で計算する方法として稲積ら<sup>23)</sup>は空気エンタルピー  $i$  および水温  $t_L$  がそれぞれの流れ方向の距離に対して指数関数分布をなしているものと仮定して、この場合の平均総括エンタルピー推進力  $(i_L - i)_m$  の計算式を導き、これによる計算値と真の平均総括エンタルピー推進力  $(i_L - i)_M$  の値との偏差とその因子との関係を検討して次式を得た。

$$\frac{(i_L - i)_M}{(i_L - i)_m} = 1.11 \left( \frac{x}{z} \right)^{-0.11} \left( \frac{i_e}{i_{Le}} \right)^{0.15} \quad (34)$$

設計計算にあたっては、装置の両端における操作条件と平衡関係を用いて  $(i_L - i)_m$  を算出し、これと式34から  $(i_L - i)_M$  を求め、塔の所要長さ  $x_0$  または高さ  $z_0$  を次式によって求めればよい。

$$x_0 = \frac{G}{K_a} \frac{(i_0 - i_e)}{(i_L - i)_M} \quad (35)$$

$$z_0 = \frac{LC_L}{K_a} \frac{(t_{Le} - t_{L0})}{(i_L - i)_M} \quad (36)$$

最近 Gardner<sup>24)</sup> は冷水塔の近似計算法として、飽和エンタルピー曲線が次式

$$i_L = A' + B't_L + C' \exp(D't_L) \quad (37)$$

ここで  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  および  $D'$  は定数

のような温度  $t_L$  の指数関数で表わされる場合における総括エンタルピー推進力基準の移動単位数の解析的計算法を提案し、向流ならびに十字流接触操作の計算の適用方法について述べている。

以上に述べた計算法はすべて総括エンタルピー移動容量係数に準拠したものであり、また水冷却操作の計算にだけ適用できるものである。

稲積ら<sup>25)</sup>は水冷却のみならず減湿および増湿操作の計算にも適用できる計算法を提案した。この方法は二重境界膜モデルに準拠したもので、空気側の顕熱移動および物質移動の速度式と Lewis の関係を用いて得られる次式

$$G \frac{\partial i}{\partial x} \Big|_z = k_H a (i_i - i) \quad (38)$$

と式38より得られるつぎの2式

$$\Delta i \Big|_z = \frac{k_H a}{G} (\Delta x) (i_i - i) \quad (39)$$

$$-\Delta t_L \Big|_x = \frac{k_H a}{LC_L} (\Delta z) (i_i - i) \quad (40)$$

中の  $\Delta x$  と  $\Delta z$  の値を適当な値に定めておき、式39と40とを交互に用いて種々の  $z$  における  $i$  対  $t_L$  の関係曲線を求めると、これが操作線となる。

塔内の各位置における気-液界面の状態を式38と液側の伝熱速度式から得られる次式

$$\frac{i_i - i}{t_i - t_L} = - \frac{h_L a}{k_H a} \quad (41)$$

と平衡関係  $f(i_i, t_i) = 0$  によって求め、 $i$  対  $t_G$  座標上における空気の状態変化の方向を次式

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Big|_z = \frac{i_i - i}{t_i - t_G} \quad (42)$$

によって求め、選定した各  $z$  における空気の  $i$  対  $t_G$  曲線を求めて行き、平均出口湿度  $H_0$  または平均出口水温  $t_{L0}$  を次式によって求め

$$H_0 = \frac{1}{z_0} \int_0^{z_0} H dz \quad (43)$$

$$t_{L0} = \frac{1}{x_0} \int_0^{x_0} t_L dx \quad (44)$$

$H_0$  または  $t_{L0}$  の値が所定の値になるまで  $z$  または  $x$  を増大させて行けば、図上から所要の  $z_0$  または  $x_0$  が求まる。

### 3. 空気と吸湿性水溶液との接触操作

塩化カルシウム、トルエチレングリコール、塩化リチウムあるいは硫酸などのような吸湿性物質の水溶液による減湿操作は古くから知られていたが、実際面に広く利用されるようになったのは第2次大戦後であり、その基礎的研究もはなはだ少ない。

高松ら<sup>28)</sup>はこの場合の計算法を提案した。この方法は空気側のエンタルピー移動速度と液側伝熱速度を等しいとおいて得られる次式

$$\frac{i-i_i}{t_L-t_i} = -\frac{h_L a}{k_H a} \quad (45)$$

の関係と気液平衡関係  $f(i_i, c_i, t_i)=0$  との関係より得られる  $c_i$  対  $t_i$  の関係および空気側と液側における水の移動速度を等しいとおいて得られる次式

$$\frac{H-H_i}{c_L-c_i} = -\frac{k_L a}{k_H a} \quad (46)$$

と気・液平衡関係  $f'(H_i, c_i, t_i)=0$  との関係より得られる  $c_i$  対  $t_i$  の関係より、両者が連立するような気-液界面の状態  $(t_i, c_i, i_i, H_i)$  を求め、空気のエントルピー  $i$  対温度  $t_g$  座標上における空気の状態変化の方向を次式

$$\frac{di}{dt_g} = \frac{i-i_i}{t_g-t_i} \quad (47)$$

によって求め、逐次図解的に空気の状態変化曲線 ( $i$  対  $t_g$ ) を求めて計算する方法である。

この場合の装置の所要高さ (または長さ)  $z$  の計算は上述の図面上からいずれかの推進力を読みとって移動単位数を求め、所要高さを計算することができるが、高松らは平衡関係を次式

$$H_i = m t_i + n c_i + b \quad (48)$$

ここで  $m, n$  および  $b$  は定数

で表わされる場合には総括物質移動容量係数の平均値  $(Ka)_m$  を用いた次式によって  $z$  を求めることを提案している。

$$\int_{i_2}^{i_1} \frac{di}{i-i_i} = -\frac{(Ka)_m}{G} z \quad (49)$$

上式で

$$\frac{1}{(Ka)_m} = \frac{1}{k_H a} + \frac{m}{h_L a} + \frac{n}{r \alpha_m k_L a} \quad (50)$$

ここで

$$\frac{1}{\alpha_m} = \int_{i_2}^{i_1} \frac{di}{\alpha(i-i_i)} \bigg/ \int_{i_2}^{i_1} \frac{di}{i-i_i} \quad (51)$$

また

$$\alpha = dQ_T / dQ_L \quad (52)$$

### 4. 可溶成分を含むガスと溶液との接触操作

この場合の計算法としては Sherwood ら<sup>27)</sup> や Kantyka ら<sup>28)</sup> が提案した逐次計算法もあるが、

計算の手続きがはなはが煩雑であり、また精度がよくない。

近年水科ら<sup>29)</sup>は熱および物質移動の抵抗をガス側についてだけ考慮すればよい場合についての図式解法を提案した。この方法は混合ガスの擬エンタルピーを次式

$$i' = yC_{HtG} + q^*Y + \varepsilon rH \quad (53)$$

で定義し、気液間の全伝熱量を次式で表わし、

$$-Gdi = k_y a (i' - i_L') dz \quad (54)$$

気-液界面の状態を熱および物質の収支から得られる操作線と平衡関係  $f(Y_L, X_L, t_L) = 0$ ;  $f'(i_L', X_L, t_L) = 0$  を用いて図解的に求め、 $i$  対  $t_G$  座標上および  $i$  対  $Y$  座標上におけるガスの状態変化の方向をそれぞれつぎの2式

$$\frac{di}{dt_G} = \frac{1}{y} \frac{i' - i_L}{t_G - t_L} \quad (55)$$

$$\frac{di}{dY} = \frac{i' - i_L}{Y - Y_L} \quad (56)$$

によって求め、ガスの  $i$  対  $t_G$  関係および  $i$  対  $Y$  関係を逐次図解的に求めて行なう計算法である。

また稲積<sup>30)</sup>は熱および物質移動の抵抗を気、液両側に対して考慮しなければならない場合についての図式解法を提案した。すなわち混合ガスの擬エンタルピーを次式

$$i_m' = C_{Hm}(t_G - t_0) + (q_m^*/y)Y' + r_{m0}(\varepsilon/y)H_m \quad (57)$$

で定義し、気液間の全伝熱量を次式で表わし、

$$-G_m di_m = k_y' a y (i_m' - i_{mi}') dz \quad (58)$$

気-液界面の状態をエンタルピー収支と物質収支から得られるつぎの2式

$$\frac{i_m' - i_{mi}'}{t_L - t_i} = -\frac{h_L}{y k_{y'}} \quad (59)$$

$$\frac{Y' - Y_i'}{X' - X_i'} = -\frac{k_{x'}}{k_{y'}} \quad (60)$$

と気-液平衡関係  $f(Y_i', X_i', t_i) = 0$ ,  $f'(i_{mi}', X_i', t_i) = 0$  を用いて図解的に求め、 $i_m$  対  $t_G$  および  $i_m$  対  $Y'$  座標上におけるガスの状態変化の方向を、ガス側における顕熱、エンタルピーおよび被吸収ガスの移動速度式を組み合わせ得られるつぎの2式

$$\frac{di_m}{dt_G} = \frac{i_m' - i_{mi}'}{t_G - t_i} \quad (61)$$

$$\frac{dY'}{di_m} = \frac{y(i_m' - i_{mi}')}{Y' - Y_i'} \quad (62)$$

によって求め、ガスのエンタルピー  $i_m$  [kcal/kg-mol dry inert gas] 対  $t_G$  関係および  $i_m$  対  $Y'$  関係を逐次図解的に求めて行なう計算法である。

## 5. その他の研究

以上に述べた計算法の他に冷却凝縮器の計算を目的として提案された方法も数種あり、これらのうちの一部は適当に修正または補足することによって気液の直接接触による調湿操作に適用できるものもあるが、これらについては他誌<sup>31-34)</sup>に解説してあるのでご参照いただきたい。

## 6. む す び

調湿操作の設計理論は、まず向流接触方式については空気の等水温増湿操作の取り扱いから端を発して、水冷却増湿操作の総括係数による計算、空気-水系の直接接触操作の各個境膜係数による計算、一般ガス-液系の直接接触操作の各個境膜係数による計算、さらに進んでガス中に可溶成分が含まれる場合の計算の順序をおって発展してきた。一方十字流接触方式については水冷却操作の総括係数による計算、一般ガスの等液温増湿操作の計算、続いて空気-水系の接触操作の各個境膜係数による計算などについて明らかにされてきたが、これらはいずれも拡散成分が一成分の場合についてのものである。

したがって今後の課題としてつぎのような事項についての研究を発展させる必要がある。'

1) 一般ガス-液系の向流接触操作の諸解析法について、合理性、実用性および特色などを再検討し、基準的方法を確立する。

2) 一般ガス-液系の十字流接触操作の解析法を明らかにする。

3) 上記2操作の差異、特色を明確にして、両者の選択基準を明確にする。

4) 上記2操作において拡散成分が多成分の場合の取り扱い方を明らかにする。

本稿では紙面の都合で省略したが、解析法と並んで今後さらに追究されるべき課題としてつぎの事項が挙げられる。

5) 気相および液相における熱移動および物質移動が相互に両者の移動速度に及ぼす影響を明らかにする。

6) この種の操作を行なう工業装置の性能の基礎的特性を明らかにする。

## 使 用 記 号

|                                                                                  |                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$ : 装置単位容積あたりの有効接触面積 $[\text{m}^2/\text{m}^3]$                                 | $h_L$ : 液側のみかけの伝熱係数 $[\text{kcal}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}]$                 |
| $a_H$ は伝熱, $a_M$ は物質移動に関する値                                                      | $i$ : 湿りガスのエンタルピー $[\text{kcal}/\text{kg dry gas}]$                                             |
| $C$ : 定圧比熱 $[\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}]$                          | $i'$ : 湿りガスの擬エンタルピー $[\text{kcal}/\text{kg dry gas}]$                                           |
| $C_H$ : 湿り比熱 $[\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{dry gas}\cdot^\circ\text{C}]$     | $im'$ : 湿りガスの擬エンタルピー<br>$[\text{kcal}/\text{kg-mol dry inert gas}]$                             |
| $C_H'$ : 湿り比熱 $[\text{kcal}/(\text{S.G.V.})\cdot^\circ\text{C}]$                 | $k_H$ : $GdH=k_Ha(H_i-H)dz$ によるガス側物質移動係数<br>$[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta H]$ |
| $C_{Hm}$ : 湿りモル比熱 $[\text{kcal}/\text{kg-mol dry gas}\cdot^\circ\text{C}]$       | $k_H'$ : (19式で定義されたガス側物質移動係数<br>$[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta\alpha'H']$      |
| $c$ : モル濃度 $[\text{kg-mol}/\text{m}^3]$                                          | $k_X$ : 液側物質移動係数 $[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta X]$                            |
| $D$ : 分子拡散係数 $[\text{m}^2/\text{hr}]$                                            | $k_X'$ : 液側物質移動係数 $[\text{kg-mol}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta X']$                      |
| $G$ : 不溶性ガスの質量速度 $[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2]$                          | $k_Y$ : ガス側物質移動係数 $[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta Y]$                           |
| $G'$ : 不溶性ガスの流量 $[\text{S.G.V.}/\text{hr}]$                                      | $k_Y'$ : ガス側物質移動係数 $[\text{kg-mol}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot\Delta Y']$                     |
| $G_m$ : 不溶性ガスの流量 $[\text{kg-mol}/\text{hr}\cdot\text{m}^2]$                      | $L$ : 液の質量速度 $[\text{kg}/\text{hr}\cdot\text{m}^2]$                                             |
| $g$ : 重力加速度 $[\text{m}/\text{hr}^2]$                                             | $P$ : 全圧 $[\text{atm}]$                                                                         |
| $H$ : ガスの湿度 $[\text{kg}/\text{kg dry gas}]$                                      | $p$ : 蒸気分圧 $[\text{atm}]$                                                                       |
| $H'$ : ガスの湿度 $[\text{kg}/\text{S.G.V.}]$                                         | $q^*$ : 混合熱 $[\text{kcal}/\text{kg}]$                                                           |
| $H_m$ : ガスのモル湿度<br>$[\text{kg-mol}/\text{kg-mol dry inert gas}]$                 |                                                                                                 |
| $h_G$ : ガス側のみかけの伝熱係数 $[\text{kcal}/\text{hr}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}]$ |                                                                                                 |

|                                                         |                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $q_m^*$ : モル混合熱 [kcal/kg-mol]                           | $Y$ : 混合ガス中の溶質の濃度<br>[kg solute/kg inert]                                                                       |
| $r$ : 蒸発潜熱 [kcal/kg]                                    | $Y'$ : 混合ガス中の溶質の濃度<br>[kg-mol solute/kg-mol inert]                                                              |
| $r_m$ : モル蒸発潜熱 [kcal/kg-mol]                            | $z_0$ : 装置の高さ [m]                                                                                               |
| $S$ : 塔断面積 [m <sup>2</sup> ]                            | $z$ : 鉛直方向の距離 [m]                                                                                               |
| $t$ : ガス温度 [°C]; $t_i$ は界面温度, $t_L$ は液温,<br>$t_0$ は基準温度 | $\epsilon$ : $k_H/k_Y$ または $k_H''/k_Y'$ ( $k_H''$ は次式による溶媒の<br>ガス側物質移動係数<br>$G'dH_m = k_H''a(H_{mi} - H_m)dz$ ) |
| $x_0$ : 装置の長さ [m]                                       | $\theta$ : 擬ポテンシャル [°C]                                                                                         |
| $X$ : 液中の溶質の濃度 [kg solute/kg solvent]                   |                                                                                                                 |
| $X'$ : 液中の溶質の濃度<br>[kg-mol solute/kg-mol solvent]       |                                                                                                                 |

## 引用文献

- 河添・竹内：化学工学，**29**，488 (1965)
- 河添邦太朗：化学工学，**26**，831 (1965)；“最近の化学工学”，p. 167 丸善 (1962)
- 中島正基：化学工学，**26**，769 (1962)
- 中島正基：化学工学，**29**，825 (1965)
- 稲積彦二：“最近の化学工学”，p. 83, 丸善 (1962)
- 稲積彦二：藤田・東畑編“化学工学Ⅲ”，p. 249, 東京化学同人 (1963)
- Merkel, F. : V. D. I. Forschungsarb., 275 (1925)
- 稲積彦二：化学工学，**17**，58 (1953)
- 稲積・山口：化学工学，**19**，645 (1955)
- Algermissen, J. : *Chem.-Ing.-Tech.*, **30**，502 (1958)
- 水科・古藤：化学機械，**13**，75 (1949)
- Mizushina, T., et al. : *Chem. Eng. Sci.*, **9**，195 (1959)
- Lewis, J. G. & R. R. White : *Ind. Eng. Chem.*, **45**，486 (1953)
- Cribb, G. S. & E. T. Nelson : *Chem. Eng. Sci.*, **5**，20 (1956)
- Huldén, B. : *Chem. Eng. Sci.*, **7**，60 (1957)
- Porter, K. E. & G. V. Jeffreys : *Trans. Chem. Engrs.* (London), **41**，126 (1963)
- Votta, F. & C. A. Walker : *A. I. Ch. E. Journal*, **4**，413 (1958)
- 稲積彦二：化学工学，**14**，148 (1950)；**15**，178 (1951)
- Mickley, H. S. : *Chem. Eng. Progr.*, **45**，739 (1949)
- Zivi, S. M. & B. B. Brand : *Refrig. Engg.*, Aug. 31 (1957)
- Schechter, R. S. & T. L. Kang. : *Ind. Eng. Chem.*, **51**，1373 (1959)
- 稲積・影山・山口：化学工学協会浜松大会講演要旨集，p. 1 (1962)
- 稲積・影山：化学工学協会第28年会講演要旨集，p. 27 (1963)
- Gardner, G. C. : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **10**，763 (1967)
- 稲積・山口：化学工学協会四日市大会講演要旨集，p. 51 (1964)
- Takamatsu et al. : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **7**，631 (1964)
- Sherwood, T. K. & R. L. Pigford : “Absorption & Extraction” 2nd ed., p. 162 (1952)
- Kantyka, T. A. & Hinckleiff : *Trans. Instn. Chem. Engrs.* (London), **22**，236 (1954)
- Mizushina et al. : *Chem. Eng. Sci.*, **10**，31 (1959)
- 稲積彦二：化学工学協会東海支部設立10周年記念名古屋大会講演要旨集，p. 11 (1963)
- 稲積彦二：化学工学，**26**，763 (1962)
- 稲積彦二：化学工学，**28**，553 (1964)
- 稲積彦二：化学工学，**29**，807 (1965)
- 河村・戸田：ケミカル・エンジニアリング，**11**，754 (1966)

## <2. 調温・調湿装置の選定と設計要領>

# 2.1 調温調湿装置の選定と設計

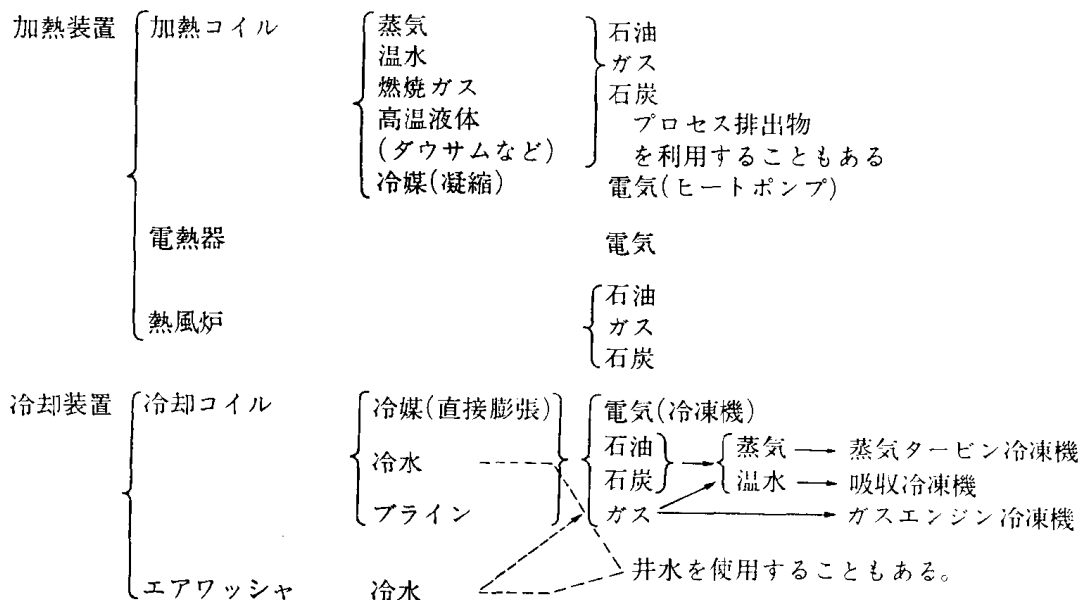
## 1. ま え が き

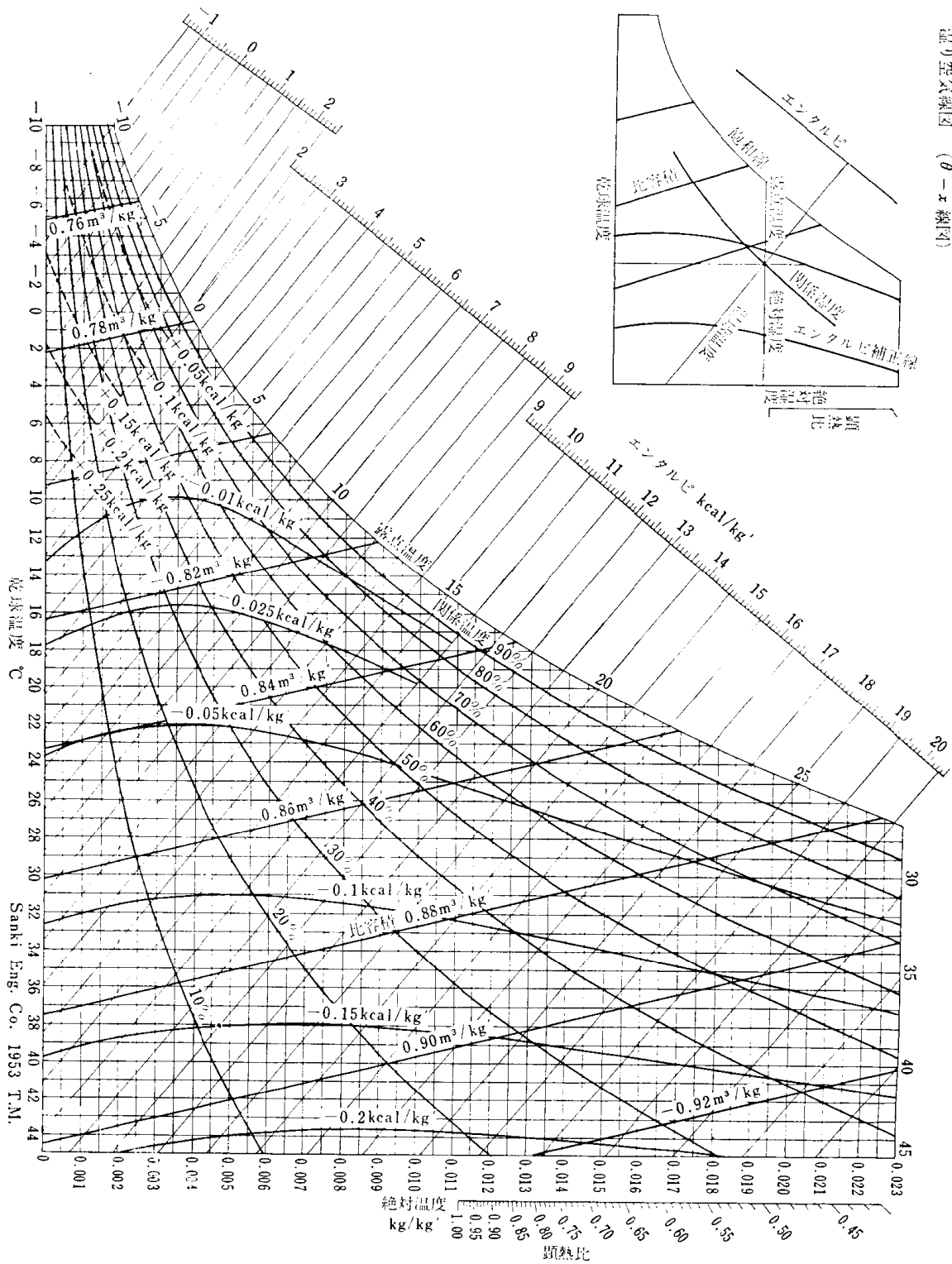
調温，調湿とはガスの温度およびガス中の水蒸気量を希望する値に調節することで，この操作としては加熱，冷却，加湿，減湿の4つに分けて考えられる．しかしガスを露点温度以下に冷却すると結露が起こり減湿されたり，加湿のためにガス中に水を噴霧するとその蒸発により温度が下がるなど相関関係があるので，上記の4つの操作を必ずしも単独に扱うわけにはいかない．

またガスの種類により比重量，比熱，凝縮温度など物性値が異なるが，ここでは主として空気について述べることにする．他のガスについても装置としては一般にあまり違う所はないが，腐食性の大きいガスや爆発，引火しやすいものなどは材料や熱源について注意しなければならない．

水蒸気を含んだ空気，すなわち湿り空気の状態を図示するには第1図のような（湿り）空気線図が用いられる．この図は大気圧におけるもので，圧力が変わると多少変わってくる．この線図を使用すると温度や湿度の変化の状態を簡単に表わすことができ，それに要する熱量などが表わされるので計算に便利である．

第 1 表





第 1 図