総 説

輸入穀類等の大型サイロにおける減圧燻蒸施設の開発

村 田 敏*・瀬 恒 幸**

Development of Multi-purpose Vacuum Grain Silo for Brief Fumigation of Imported Cereals and Breaking Bridge in Storage

Satoshi MURATA* and Tsuneyuki SE**

* Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-1-10 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, 812

** Nihon Kunjo Kaihatsu Co. Ltd., 8-16-24 Fukushima, Fukushima-ku, Osaka-shi, 553

わが国には毎年、食品および飼料の蛋白原料として大量の大豆ミール(34万 ton, 昭和53年)が輸入されており、植物防疫法の規定によって港湾サイロで燻蒸による殺菌・殺虫が行なわれている。しかし大豆ミールは粉体と粒体の混合物であり、その大量処理に際して、燻蒸ガスの分布むらやブリッジを生じやすく、操作は面倒と考えられている。わが国で最近完成して普及のはじまった減圧燻蒸法は、減圧した穀物サイロの真空破壊部¹⁾をガス混合大気で行なうもので、穀層内へのガス浸透速度の早いこと、ガス濃度むらの小さいことおよびブリッジ破壊が容易に行なえる等の特長を備えている。現在、施設費の点にやや問題があるが、将来性のある技術と考えられる。ここではまず、従来の燻蒸法を簡単に説明し、その上で、この燻蒸法の特性を説明することとする。

1. 穀物燻蒸消毒とは

燻蒸消毒とは、殺菌または殺虫効果のあるガスを発生する薬剤(燻蒸剤)よりガスを発生させ、対象物に触れさせるか、または浸透させることによって、対象物の表面または内部にある菌や害虫を死滅させる方法であって、対象物の品温を上げることなく大量に処理できる点に特長がある。燻蒸剤²⁴⁾としては、アンモニア、一酸化炭素、塩素、ギ酸エチル、ギ酸メチル、クロールピクリン、酸化エチレン、酸化プロピレン、臭化メチル、四塩化炭

素、青酸、トリクロルエチレン、ナフタレン、二塩化エチレン、二塩化プロピレン、二臭化エチレン、二酸化炭素、二酸化硫黄、ニトリル、二硫化炭素、パラジクロベンゼン、フォルムアルデヒド、ペータープロピオラクトン、燐化水素などがあるが、現在植物防疫燻蒸に利用されているのは、青酸ガス、臭化メチル、燐化アルミニウム剤(燐化水素)の3つで、穀物にはあとの2剤が用いられている。

穀類の燻蒸には貯蔵の形態に応じて穀類倉庫燻蒸、穀類サイロ燻蒸、穀類バラ積み倉庫燻蒸、はしけ燻蒸等があり、これらのいずれにも臭化メチルを利用する臭化メチル燻蒸法と燐化アルミニウムを利用する燐化アルミニウム燻蒸法がある。前者は臭化メチルの加熱気化装置と気化ガスを空気と混合し穀層を通して強制循環させるプロア・ダクト系によって行なわれ、後者は倉庫燻蒸以外は穀層中に燐化アルミニウム錠を混合又は挿入して自然に分解させ発生した燐化水素を自然拡散させて行なわれる。錠剤の混入は搬入時に手又は自動投入器によって行なわれる。倉庫燻蒸では錠剤を投薬用容器に並べ分解・拡散させる。

輸入穀物の場合にはハンドリングの点でサイロ貯蔵が一般的なので穀物サイロ燻蒸が重要となる。

注) 減圧されたチャンパーのバルブを開放して、常圧に戻すこと。

* 九州大学農学部(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 日本燻蒸開発(株)(〒553 大阪市福島区福島 8-16-24)

2. 燻蒸剤の殺菌・殺虫効果

燻蒸剤は殺菌・殺虫の目的のために行なわれるものであるが、現在では殺虫に重点がおかれているようである。その効果はガス濃度が高く、燻蒸時間が長く、気温が高い程大きく、かつ穀物の種類の影響を受ける(図1)¹⁰⁾。したがって基準薬量は燻蒸時間、季節、穀物の種類によって決められている。その量は、小麦、12月、A級サイロ*の場合、臭化メチルでは 23 gr/m^3 -サイロ内容積 $\times 3$ 日、燐化アルミでは $2.0 \text{ gr/m}^3 \times 7$ 日のように与えられる。大豆ミールでは、臭化メチルによるサイロ内燻蒸の基準量は与えられていない(認められていない)。

図2¹⁵⁾に臭化メチルの殺カビ効果と表1⁹⁾に各種燻蒸剤の殺虫力を示す。

図1 害虫の臭化メチル感受性に対する温度の影響(くん蒸時間5時間)

3. 減圧燻蒸法の開発

前節で説明したように、大豆ミールのように、粉状、

* 最上級の気密テストに合格したもの

図2 定薬量 (10.5 g/m^3) で各時間くん蒸した際の *P. islandicum* 分生子の死滅率(鶴田, 1960)

かす状のもの、ペレット・ケーキ類のサイロにおける臭化メチル燻蒸は認められていない。これは、従来のように大気圧のもとでブローによって気化ガスを循環する方法では、粒度偏折を起こした粉状部にガスが侵入しないこと、またガスの侵入速度が遅いこと、これらの原料ではガス収着量と速度が大きいために、途中でガスが収着され末端に届かないために全体の殺菌・殺虫効果が期待できないためである。燐化アルミの投薬は認められているが、これには低温($<5^\circ\text{C}$)では気化せず、燻蒸時間が長く、穀類搬入時に錠剤を一緒に混入していかなければならぬこと等、大量処理を能率的に行なうためには難点がある。

これらの難点を解決するために開発されたのが、ここに紹介する減圧燻蒸法であって、減圧したサイロの真空破壊を燻蒸ガス混合大気によって行なうものである。著者はかねてより穀物の真空冷却貯蔵乾燥施設⁴⁾の研究を行ってきたが、減圧した穀層の圧力はパルプの開放によって速やかに隅々まで大気圧に回復する。この大気を混合ガスに置き換えることを提案することによって、この施設の開発は始まった。実物大のサイロにおいても、ガスの浸透が充分に行なわれることがこの研究に基づく理論計算から保証され、昭和52年6月2日に福岡市で直径 970ϕ 、全高約7mの試験装置が試作され、日本燻蒸

表1 数種くん蒸剤の理化学性および殺虫力

くん蒸剤	化学式	分子量	1) ガス比重	沸点 ($^\circ\text{C}$)	2) 水に対する溶解度	3) 95%殺虫に要する濃度 (g/m^3)		
						コクゾウ	グラナリヤコクゾウ	ヒラタコクヌストモドキ
青酸ガス	HCN	27.03	0.94	26.0	∞	5.9	9.9	1.6
ホルムアルデヒド	HCHO	30.03	1.03	-21.0	55	—	—	—
りん化水素	PH_3	34.03	1.18	-87.4	0.0004	—	—	—
エチレンオキシド	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \end{array} > \text{O}$	44.05	1.52	10.7	∞	10.4	24.5	37.5
臭化メチル	CH_3Br	94.95	3.29	4.5	1.75	6.1	6.8	13.8
クロルピクリン	CCl_3NO_2	164.38	5.69	112.0	0.16	3.9	8.0	13.0
エチレンジブロマイド	$\text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$	187.86	6.50	131.0	0.4	10.0	12.0	7.2

注) 1) 空気を1とした値 2) 水100gにとけるg数 3) 25°C 、6時間くん蒸の値

写真1 テストプラント，
大阪市，1977 写真2 コンクリートサイロ，
鹿児島市，1978

写真3 鉄板サイロ，福岡市，1980

開発(株)の手で試験が開始された。試作当時は、大気への臭化メチル混合装置の能力不足からサイロ内に濃度むらを生じたが、この試験の過程で、大気(底部開放)とサイロ上部空間の圧力差水柱にして約10m)によって穀層が押し上げられ、落下する迄の運動によるブリッジの破壊現象が発見された。この解析をもとに同年7月直径1970φ、全高約17mのテストプラントが大阪市に建設され(写真1)、多くの関係者を集めてテストが行われた。この時ブリッジ破壊効果が実物大に近い規模で確認された。翌昭和53年8月には、鹿児島谷山地区の鹿児島帝国倉庫(株)に500ton×6基=3000tonの真空燻蒸サイロが完成した(写真2)。このサイロはコンクリートサイロであったが、真空保持は良好で(20 torrにおけるリークが1hrで2.5 torr程度)、慎重に行なわれたテストは成功であった。続いて昭和55年3月、福岡市箱崎埠頭、(株)上組箱崎第二サイロに400ton×14基=5,600tonの真空燻蒸サイロ(これは鉄板型)が完成して稼働している(写真3)。

4. 減圧燻蒸施設の構造と操作

この施設は、減圧を利用したブリッジ破壊装置と減圧燻蒸装置の両方を備えている。

図3はサイロとそれらの接続図である。構造としては従来の臭化ガス用循環式燻蒸サイロに、真空系と圧力系を取り付けた形になっている。サイロ構造は、マイナス1気圧の座屈と数気圧(下部)の正圧に耐える堅牢なものでなくてはならない。

1. ブリッジ破壊操作

図3 減圧くん蒸サイロとその接続図

まず、A1、A2以外の全てのバルブを閉じ、真空ポンプによってサイロ内を60 torr程度に減圧し、A1、A2バルブを閉じ、A3バルブを開いてストレージタンク内の高圧空気(4~7気圧)を流入させる。ストレージタンクの容量はサイロ容積の約20分の1に設計してある。穀層は減圧された上部空間と下部に流入した高圧空気の圧力差によって浮遊し、ついで流動化して、落下してくる。この落下は、下部から上部に空気が吹き抜けて、上部空間圧が高まることによって起こる。A3バルブはストレージタンクの内圧が2.5気圧以上下がるか、サイロ底部圧が4気圧以上上がった場合は安全のために自動的に閉じられる。あらかじめ真空にするのは、穀層の上昇

運動に際して、上部空間が圧縮され、高圧となって穀層の運動を妨害するのを防止すると安全のためである。

2. 真空燻蒸

ブリッジ破壊と同様、先ずサイロ内を減圧した後に B1, B2 バルブを開いて臭化ガスを気化器に通した後、空気と混合することなく上部に導き、上部空間に混合拡散して穀層に吸い込ませる(5分程度)。次に B1 バルブを閉じ、B3, B4 バルブを開いて大気を導入する。この途中の管路で気化器を通った臭化ガスが混合されるから、穀層には混合ガスが浸透していく。この混合ガス流入速度は、穀層の圧力回復と共に減少するから、B4 バルブを閉じ B5 バルブを開いてルーツプロアを運転し、大気を圧入する。約20分して、穀層圧が大気に戻った時点で B5, B2 バルブを閉じ B6 バルブを開いて、穀層内の混合ガスを循環させる。これらの操作はやや面倒であるが、これによって従来の循環法では不可能であった大豆ミールの完全殺虫効果が確認されることとなった。このような面倒な操作は本来不要なのであるが、気化器の気化能力が一定であって、大気の流入速度に追従しないこと、穀層内の残留空気が混合ガスに押し上げられて上部に滞留すること、混合ガスが途中で吸着されること等によって生じる濃度むらを平均化するためにとられる処置であって、将来は簡略化されるべきものである。

5. 穀層の運動とブリッジ破壊⁽⁵⁾⁽⁶⁾

穀層の運動が起こることがブリッジの破壊の条件なので、穀層の運動の起こる機構を解析する。

図4に見るように穀層の上昇は底部の気圧と上部空間

図4 穀層の運動

の気圧の差に基づいて起こり、それは対する抵抗力は穀層の重量 W と壁面の抵抗であるからその運動方程式は、次のようになる。

$$\frac{W}{g} \frac{d^2 Y}{dt^2} = S(p_e - p_u) - W - R \quad (1)$$

簡単のために、減圧していることから、 $p_u = 0$, $R = 0$, 更に p_e は、底部がストレージタンクと損失なしにつながっているとし、断熱膨張を仮定すると式(1)は次式*となる。

表2 ストレージタンク初圧と穀層の運動

Sp_0/W	2.5	3.0	4.0	4.23	5.0	6.0	7.0
p_0 kgf/cm ²	3.0	3.5	4.7	5.0	5.9	7.1	8.3
H_{max} m	0.23	0.79	1.95	2.23	3.18	4.45	5.76
p kgf/cm ²	2.5	2.0	1.6	1.5	1.3	1.2	0.9

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} = g \left\{ \frac{Sp_0}{W} \left/ \left(1 + \frac{S}{V_0} Y \right)^{1.4} - 1 - \frac{R}{W} \right. \right\} \quad (2)$$

$g = 9.8$ m/sec, $W = 475$ ton, $S = 44.18$ m², $V_0 = 74$ m³ (ストレージタンク容積), $R/W = 1.28$ (ヤンセン式)

とし、ストレージタンク初圧と最高到達高さおよび到達時間の関係を表2に示す。

ここに示した圧力は絶対圧であるから、ゲージ圧では約 1 kgf/cm² を減じなければならない。この解からストレージタンクの初圧として 2.5~4.0 kgf/cm² が適切であることがわかる。4.0 kgf/cm² であれば上昇限界は 2.23 m で上部空間と一致する。したがってここまでは安全である。 $\frac{R}{W}$ はヤンセン式で計算した値であるが、ブリッジのある場合初抵抗はこれより大きいと考えられる。この初圧の最大値は現在 7 kgf/cm² であるが、この場合穀層は天井を突き破るおそれがあるため、2.5 kgf/cm² にストレージタンクの圧力が低下したら自動的にバルブが閉じるようになっている。上昇して落下する迄の時間は 20~40 sec でこの間に流動化が起きている。

6. ガス燻蒸時の偏析部圧力回復⁽⁵⁾⁽⁶⁾

吸着の問題を考えなければ、減圧後混合ガスを導入したときの圧力回復がガス浸透の指標となる。大気圧に開放して混合ガスを導入する (a 方式) か、ルーツプロアで導入する (b 方式) かの2方式を考えて計算する。この圧力回復の方程式は近似的に拡散の方程式に従う。偏析部は平均値の粒子径の 10 分の1として、サイロの一端から侵入したガスが他端に達した後、偏析部の中心に向かって浸透すると仮定する (図5)。

圧力の回復に関する基礎方程式と初期および境界条件は次の通りである。a 方式と b 方式は境界条件によって示される。

$$\text{基礎方程式} \quad \frac{\partial p}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (3)$$

* この項は落下の際には逆符号となり絶対値は1より小さくなる。したがって最大値(最高位置)に達して浮遊状態が続き、空気の吹き抜けが起こって上部の圧力が高まってから落下が起こる。

表3 末端圧力回復時間

a 方式による末端圧力回復時間						b 方式による末端圧力回復時間 (min)							
p/p_a	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99	p/p_a	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99	1.00
粒	22	28	39	49	75	粒	14.3	17.1	18.6	20.0	20.7	21.2	21.4
粉	7	9	12	16	24	粉	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
計	29	37	51	65	99	計	14.7	17.7	19.2	20.7	21.4	22.0	22.2

長時間すぎる

20分程度で圧力回復

図5 偏析部へのガスの浸透

周辺部では, $D_2 = 8.368 \text{ m}^2/\text{min}$ 偏析部では, $D_3 = 8.368 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$

a 方式: 一端を混合ガスに開放

$$\text{I. C. } p=0, 0 \leq x \leq l \quad (4)$$

$$\text{B. C. } p=p_a, x=0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, x=l \quad (6)$$

b 方式: 一端より定圧混合ガスをプロアで
一定量強制的に送る

$$\text{I. C. } p=0, 0 \leq x \leq l \quad (7)$$

$$\text{B. C. } -\mu_g \frac{\partial p}{\partial x} = p_a v \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, x=l \quad (9)$$

結果は表3の通りであって, a 方式では粉部にガスの侵入が困難で長時間を要することがわかる。実際にはダクト系の抵抗があって一端の圧力が大気圧にはならないから, 極めて長時間を要し実用的でない。

b 方式であれば, 20分程度でガスが行き渡ることがわかる。従来の循環方向であれば, 水平方向に圧力差がないから, 粒部のガスは偏析部に向って混合ガスの浸透ではなく, 純拡散で侵入しなければならない。純拡散の拡散係数は理論計算¹³⁾ ($D = 3.542 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}^*$ であって, 混合ガス浸透の拡散係数に比べ二桁大きいから実際上ガスの侵入はない。

* 他の文献では $D = 0.0999 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (25°C)²⁾ 図6 大豆カスの収容比別空間臭化メチルガス濃度の経時変化 (投薬ガス濃度 30 mg/l , 温度 20°C) (相馬ら, 1978)

吸着については相馬らのデータ¹³⁾ (図6) によれば, 20分程度ではほとんど吸着は起こらないことが示されている。しかし, 粒子間にあるガスの吸着はもっと大きいと推定される。測定データの解析より, 表4の結果が得られた。

この結果からも, 20分程度であれば殺菌・殺虫に必要な濃度は保たれる。実際の施設では, b 方式 20分法がとられており, 殺虫効果が実証されている。

7. 減圧による減量の評価

減圧が大豆ミールの飽和蒸気圧 (表5) 以下にとどまっているならば, 減圧によって空気と共に排出される水分量, すなわち乾燥による減量は次の理由から無視できるほど小さく, 最大に見積っても 0.04% 程度である。すなわち, ミール間隙の水蒸気が飽和 (定温で一定) として毎時の排気量を Q とすれば

$$V \frac{d}{dt} (p - p_w) = - (p - p_w) \quad (10)$$

$$dt = - \frac{V}{Q} \frac{dp}{p - p_w} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{全減量} &= \int \rho_w Q dt = - \rho_w V \int \frac{dp}{p - p_w} \\ &= \rho_w V \ln \frac{p_i - p_w}{p - p_w} \end{aligned} \quad (12)$$

表 4 大豆ミール空隙における臭化メチルの吸着速度

時 間 (min)	0	5	10	15	20	30	40	50	60
濃 度 (gr/m ³)	66.4	43.9	34.6	27.5	21.5	20.8	20.2	19.6	19.1

表 5 大豆ミールの飽和蒸気圧 (含水率 13.0% w.b.)

温 度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
蒸 気 圧 (Torr)	3.2	4.5	6.4	8.8	12.1	16.4	22.0	29.2	38.3

ここに $V=0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (大豆ミールをサイロに充填した場合)

$$T=273.16+25=298.16^\circ\text{K}$$

$$\rho_w=23.75 \text{ mmHg} \times 0.7=16.625 \text{ mmHg} \text{ (大豆ミールの水分活性を } 0.7 \text{ とする)}$$

$$R_w=47.06 \text{ kg}\cdot\text{f}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot^\circ\text{K} \text{ (水蒸気のガス定数)}$$

$$\rho_w=\frac{p_w}{R_w T}=0.01661 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (13)$$

これらより全減量は 1 m^3 の大豆ミールに対して 0.0229 kg となる。水分 13.6% の大豆ミールのかさ密度は $610 \text{ kg}/\text{m}^3$ であるから、これは 0.0375% に当る。実際には排気中空隙は完全に飽和していないので減量はこれより小さい。実測結果は理論値より小さいことが示されている。

8. 残留空気による濃度むら

前述したように、臭化メチルの空気に対する拡散係数は極めて小さいから、サイロ下方から混合ガスが侵入するにつれ残留空気は上方に押し上げられ、上方に極めてガスの希薄な部分が形成される。この除去は純粋拡散係

数が小さいため極めて困難であるが、平衡圧近くまで減圧すること、上方に次式で示すような希薄ガスの逃げ場を設けて、ここで混合拡散によって高濃度のガスを混合し循環することが必要である。

$$Z=\frac{p-p_w}{p_a-(1-\varepsilon)(p-p_w)} \quad (14)$$

$$p_a=760, p=60, p_w=16.625, \varepsilon=0.541 \text{ とし} \\ \text{て } Z=0.059 \text{ (6\% の空間)}$$

実際の施設では先ず上方空間に生ガスを導入し、次に下方より混合ガスを導入し、押し出された希薄ガスがこの部分で混合されている。この空間は減圧程度が小さい程、また回復圧 p_a が小さい程、大きくしなければならぬから注意を要する。この空間が小さいと前処理や循環によっても希薄部分の除去は面倒になる。

9. 検 査 結 果

1. 検虫結果¹⁾

表 6 に示すとおり。

燻蒸場所: 鹿児島帝國倉庫(株), 鹿児島市南栄 4-33

燻蒸日時: 昭和 55 年 9 月 16~18 日 (48 hr)

表 6 検虫結果 (ヒラタクモス・ストモドキ)

検 虫 個 所	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	内壁近傍			マンホール			コニ カル	外部
													上	中	下	上	中	下		
供試虫数	17	25	20	37	20	24	24	26	25	18	24	12	20	40	30	14	13	29	21	45
生 虫 数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45
殺虫率%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0

表 7 臭化メチル残留分析結果

	臭化メチル (ppm)			全 臭 素 (ppm)		
	実 測 値	平 均 値	平 均 値	実 測 値	平 均 値	平 均 値
くん 蒸 前	<0.005	<0.005	<0.005	16	17	16
くん 蒸 直 後 {サイロ上部 サイロ下部	0.156	0.186	0.171	160	166	163
	0.068	0.072	0.070	105	110	108
14 日 後 {サイロ上部 サイロ下部	0.014	0.014	0.014	172	173	172
	0.011	0.011	0.011	101	108	104

サイロ容積 975 m³, 大豆シール 522 ton, メチル投薬量 39 kg

2. 臭化メチル残留分析⁸⁾

表7に示すとおり。

分析者: 日本食品分析センター

10. 今後の問題

この真空燻蒸法を最初企画したときは、完全に混合された濃度一定の混合ガスを、真空破壊によって一挙に穀層と分散させることにあった。しかし、装置の制約から混合させながら導入しているのが現状である。気化器の能力が一定なので、濃度を一定にしようとするれば、真空破壊初期の流量を制限せざるを得ず、面倒な操作と吸着による濃度むらを生じやすい。この点の改良が望まれる。ブリッジ破壊のように高圧混合ガスによって瞬間的な流動化を行えば、秒単位で混合が行なわれるから、吸着によるむらを生じることはないと考えられる。このような方法は、将来理想的と考えられるが、検虫やガス濃度分布の測定方法の解決が必要である。

最近、炭酸ガス燻蒸による殺菌・殺虫の効果が確認されつつあるが¹¹⁾、この減圧燻蒸法にとって極めて適した燻蒸剤である。

尚、真空のみでも殺虫効果のあることは知られており(森, 1952⁸⁾)、無公害殺虫法としてこれらの将来における利用が期待される。

文 献

- 1) PIXTON, S.W. and WARBURTON, S: *J. Stored Product Res.*, 11, 249 (1975).
- 2) MITSUI, E.: *Training in Storage and Preservation of Food Grains*, (Asian Productivity Organization) p. 233 (1970).
- 3) 森 八郎: 応用動物学雑誌, 17, 83 (1952).
- 4) 村田 敏: 冷凍, 49, 945 (1974).
- 5) 村田 敏: 日本食品工業学会第25回講演要旨集, p. 28, 東京 (1978).
- 6) 村田 敏: 昭和54年度日本冷凍協会学術講演集, p. 5 (1979).
- 7) 日本燻蒸開発(株), サイロにおける飼料副原料の臭化メチルによる減圧拡散投薬燻蒸法・第1回立合試験報告書, p. 2 (1980).

- 8) (財団法人)日本食品分析センター, 臭化メチル残留分析結果報告書, p. 1 (1980).
- 9) 農林省植物防疫所, くん蒸の理論と実際, その1, p. 3 (1977).
- 10) 農林省植物防疫所, くん蒸の理論と実際, その2, p. 10 (1977).
- 11) SHEJBAL, J. (ed.), *Controlled Atmosphere Storage of Grains*, 1st ed., (Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam) p. 225 (1980).
- 12) 相馬幸博・秋山博志・川本 登: 植物検報, 15, 15 (1978).
- 13) 蔭田 董: 粘度と熱伝導率, 初版 (培風館, 東京), p. 78 (1975).
- 14) 宇田川俊一・鶴田 理: かびと食物, 初版 (医歯薬出版, 東京) p. 252 (1975).
- 15) 宇田川俊一・鶴田 理: かびと食物, 初版 (医歯薬出版, 東京), p. 254 (1975).

記 号

- D : くん蒸ガスの純拡散係数 (m²/sec 又は m²/min)
- D_2 : 穀物間隙空気の圧力回復拡散係数 (m²/sec 又は m²/min)
- g : 重力の加速度 (m/sec² 又は m/min²)
- $H_{\max}$: 穀層の最高上昇高さ (m)
- l : 穀層の厚さ (m)
- p : 圧力 (kgf/m²), p_a : 大気の, p_s : サイロ下部の, p_i : 初期の, p_v : サイロ上部の, p_w : 穀物に対する平衡の
- Q : 真空ポンプの排気量 (m³/min 又は m³/sec)
- R : サイロ壁の抵抗 (kgf)
- R_w : 水蒸気的气体定数 (kgf·m/kg·°K)
- S : サイロの断面積 (m²)
- t : 時間 (sec 又は min)
- T : 絶対温度 (°K)
- v : 流速 (m/sec 又は m/min)
- V : 穀物の空隙を含めた全空間のサイロ容積に対する比 (m³/m³)
- V_0 : ストレージタンクの容積 (m³)
- W : 穀層重量 (kgf)
- Y : 穀層下部の上昇時の座標 (m)
- ギリシヤ文字
- ε : 穀物の空隙率 (m³/m³)
- μ_g : 穀物のコンダクタンス (m²/sec 又は m³/min)
- ρ_w : 水蒸気の密度 (kg/m³)

(昭和56年7月23日受理)