

〔醸酵工学 第55巻 第4号 175-178. 1977〕

連続通風製麴における麴層内の温度分布*

永谷 正治・服部 靖夫**・布川弥太郎

国税庁醸造試験所 **天野製薬株式会社

Temperature distribution of a solid culture of *koji* under continuous aeration. NAGATANI, M., Y. HATTORI,** and Y. NUNOKAWA (*National Research Institute of Brewing, Japan* 2-6, Takinogawa, Kita-ku, Tokyo 114, ***Amano Pharmaceutical Co. Ltd., Nishiharu-cho, Nishikasugai-gun, Aichi Pref. 481*) *Hakkokogaku* 55: 175-178, 1977.

In the mass culture of solid *koji*, the heaped medium is commonly subjected to forced aeration as a means of temperature control. The temperature distribution that inevitably appears along the air flow is discussed in this report. The distribution could be correlated with the aeration rate and the depth of *koji* layer from the viewpoint of heat and mass transfer.

Rice *koji* at its maximum growth period showed an almost linear temperature profile, 36.2°C at the bottom and 38.4°C at the top, for a 12-cm depth of *koji* at an aeration rate of 91.5 kg/m³/hr, while the heat evolution was about 2,500 kcal/m³/hr.

Calculations using a theoretical equation agreed with the experimental data of the temperature distribution of rice *koji*.

堆積通風培養下の麴は、一種の充てん層とみなすことができ、麴から空気流への顕熱および潜熱移動に関しては、大きな容量係数を有するものと考えられる。著者は、以前に、蒸米の強制通風冷却操作において米粒を湿球とみなし、冷水塔の操作式を適用して、冷却速度を説明した。¹⁾ 本報では、この知見をふまえて同じく麴を湿球と仮定し、麴堆積層の通風方向に熱収支をとり、定常的な通風および温度条件下における層内温度分布と、それに関連する要因との間の定量的関係を導き、その結果を実測値と比較することを試みたので、その経過を報告する。

実験方法

試料 精米歩合75%の酒造用白米 20 kg を、麴室内で常法通り製麴した。盛り以降は、同室内に設けた簡易自動製麴装置(室内空気を間欠的に通風する型式)に収納した。引き込み後 38 hr, すなわち、発熱の最盛期に製麴機上の麴をよく混合して採取し、測定に供した。

装置 Fig. 1 に、麴層内温度分布測定装置を示す。本体は、内径 83 mm の塩化ビニル製円筒で、これに麴を採取し、側孔から各位置に挿入した温度計によ

て、麴温度を測定した。温度計は、石油類試験用 (JIS B7410) を用いた。5 本の間の示度の差は、最大で 0.1°C であったので補正せずにそのまま用いた。温度計の先端が、円筒の中心に来るように設置し、円筒外側は、発泡スチロールを 35 mm 厚さに巻いて断熱した。円筒底部から空気を送入した。送入空気の温湿度調節には、同じく Fig. 1 に示す碎石充てん塔を用いた。これに恒温水槽内の温水を、ポンプで約 10 l/min の速度で循環させ、空気はコンプレッサーから減圧弁 2 個を経て、流量計を通して碎石充てん塔の底部へ導き、温水と向流接触したのち、測定用円筒へ送入した。

測定方法 測定装置を麴室内に持ち込んだ。製麴機上の麴は 40°C に維持した。これをよく混合して測定用円筒に採取し、温度計を挿入し、Fig. 1 に示す調湿装置を通して通風を開始した。通風開始してからしばらくは温度分布が変動し、いわゆる遷移状態を示すが、やがて安定した分布に落ちついた。このときの温度分布を定常値と考え、記録した。この測定は、試料を取り替え、通風速度を変えて数回行ったが、全所要時間は 4 hr 以内であった。

* 通風製麴に関する研究 (第 1 報)

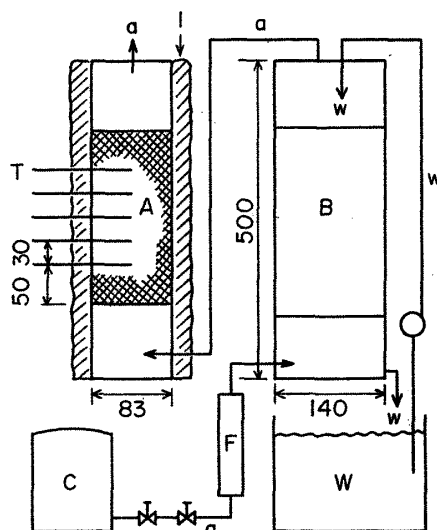


Fig. 1. The apparatus for the measurement of the temperature distribution in the *koji* layer.

A: main cylinder containing *koji* (hatched area).

B: air-water contactor packed with crushed stone (≈ 10 mm ϕ).

C: air compressor.

F: air flow meter.

I: insulation.

T: thermometer.

W: water bath.

a: air flow.

w: water flow.

(unit: mm)

結果および考察

定常状態における熱収支 連続通風条件で、かつ、麹層内の温度分布が変動しない状態を考える。Fig. 2に示すように、堆積層の底から空気が流速 G (kg-D.A.*), エンタルピー i_i (kcal/kg-D.A.) で吹きこまれ、層頂からは i_a となって流出している。堆積層の水平断面積を A (m 2), 堆積層単位容積あたりの発熱速度を Q (kcal/m 3 /hr) とし、系からの熱伝導およびふく射による熱損失を無視すれば次式が成立する。

$$Gdi = QAdZ \quad (1)$$

ただし Z は高さ方向の距離である。

一方、麹を湿球と仮定すれば、調湿操作の理論**により次式が成立する。

$$Gdi = k_{Ha}AdZ(i_i - i) \quad (2)$$

ただし、 k_{Ha} は堆積層の示す水蒸気移動の容量係数 (kg-water/m 3 /hr/ ΔH (H : 絶対湿度), i_i は麹粒子表面

* D.A.=dry air

** 化学工学便覧 (三版) p. 602 丸善 (1968).

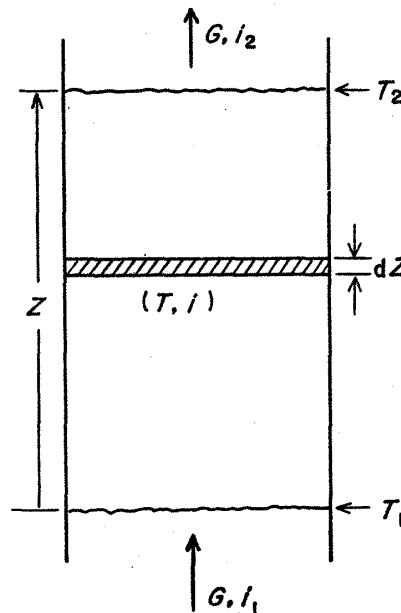


Fig. 2. Schematic diagram of *koji* layer (c.f. Eqns. (1) and (2)).

空気のエンタルピーで、仮定により飽和湿り空気の値と等しい。

(1), (2)式から次式がえられる。

$$i_i - i = Q/k_{Ha} \quad (3)$$

ここで、 Q/k_{Ha} の値のオーダーを推定してみる。麹の発熱速度 Q の値は豊沢ら、²⁾ 高野³⁾によれば、清酒麹で最大 6~7 kcal/kg-rice/hr であり、充てん密度は約 500 kg-rice/m 3 であるから、 Q は 3,000~3,500 kcal/m 3 /hr となる。次に、 k_{Ha} の値は、麹を通風乾燥したときの初期に認められる恒率乾燥の速度から求めると、 3.6×10^4 (kg/m 3 /hr/ ΔH) であった。^{***} したがって、米麹では、 Q/k_{Ha} は 0.1 (kcal/kg-D.A.) 以下である。(3)式によれば、これが麹粒表面の空気境界の両側におけるエンタルピーの差であるが、空気線図を参照すれば、上記の 0.1 という値はきわめて小さい。このことは、麹層中を流れている空気の状態は、現在接している麹粒子温度の飽和湿り空気と近似できることを意味する。この知見は、製麹装置の設計および操作上有用と考えられる。

堆積層高さ方向の温度分布は、以下の方法で推定し

^{***} 乾燥条件は、 $G/A = 330$ kg/m 3 /hr で行った。 k_{Ha} は次式で計算した。

$$-dw/dt = k_{Ha}(H_i - H) \quad (4)$$

恒率乾燥の間は、麹温度は一定であるから、その温度における飽和湿り空気の湿度を H_i とした。 H の値は、乾湿球温度計に基づいて求めた。

た。麹の発熱速度 Q 、および飽和湿り空気エンタルピー i_i は、いずれも温度の関数だから、麹層上下の温度差があまり大きくない範囲であれば、温度 T の一次式で近似できる。すなわち、層底（空気入口側）温度を T_1 とすれば、

$$Q = a_1 + a_2(T - T_1) \quad (5)$$

$$i_i = b_1 + b_2(T - T_1) \quad (6)$$

と表す。(5)、(6) 式を (3) 式に代入して次式をえた。

$$i = \left(b_1 - \frac{a_1}{k_{Ha}} \right) + \left(b_2 - \frac{a_2}{k_{Ha}} \right) (T - T_1) \quad (7)$$

(7) 式を微分したもの、および (5) 式を (1) 式に代入して (8) 式をえた。

$$\left(b_2 - \frac{a_2}{k_{Ha}} \right) \frac{d}{dZ} (T - T_1) = \frac{1}{G/A} \{ a_1 + a_2(T - T_1) \} \quad (8)$$

(8) 式を $Z=0 \sim Z$, $T=T_1 \sim T$ の範囲で積分して次式をえた。

$$\left(\frac{b_2}{a_2} - \frac{1}{k_{Ha}} \right) \ln \left\{ 1 + \frac{a_2}{a_1} (T - T_1) \right\} = \frac{Z}{G/A} \quad (9)$$

(9) 式により、 Z に対応する T の値を求めることができる。温度範囲、発熱速度および通風速度を、実際の製麹条件範囲にとって試算した例を Fig. 3 に示す。図の下側には試算に用いた数値を掲げた。

Q に対する温度係数 b_2 を求めるには、Calam ら⁴⁾ および照井ら⁵⁾ のデータを参考にして次式を仮定した。

$$Q_2/Q_1 = e^{k(T_2 - T_1)} \quad (10)$$

$$k = \ln(2/10) \quad (11)$$

ただし、 Q_1 , Q_2 は温度 T_1 , T_2 における発熱速度で

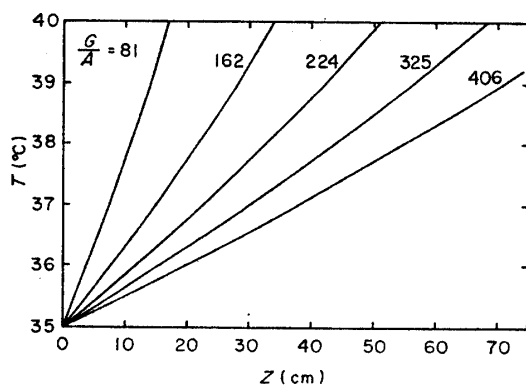


Fig. 3. Temperature distributions in the koji layer calculated from Eq. (9).

$T_1 = 35^\circ\text{C}$, $T_2 = 40^\circ\text{C}$, $i_1 = 30.7 \text{ kcal/kg}$, $i_2 = 39.6 \text{ kcal/kg}$, $k_{Ha} = 3.6 \times 10^4 \text{ kg/(m}^3\text{hr}\Delta H)$, $G/A = \text{parameter, kg/(m}^3\text{hr)}$

ある。(11) 式に示す k の値は、温度が 10°C 上昇すると Q の値が 2 倍になるように定めたものである。 35°C の Q の値 ($=a_1$) を $3,500 \text{ kcal/m}^3\text{hr}$ とし、(10) 式により 40°C の Q の値を求め、その两点を直線で結び、その傾斜を a_2 とした。(6) 式の b_1 , b_2 も同様に 35°C および 40°C における飽和湿り空気エンタルピーを空気線図より求め、两点を直線で結んで求めた。 k_{Ha} の値は、前に述べたように 3.6×10^4 とした。

Fig. 3 は、麹層の底を 35°C 、頂面を 40°C にきめた場合、 G/A をパラメーターとして層の厚さとその中の温度分布を示したもので、通風速度を大にすれば、層厚を大にして操作できることが明らかである。

Fig. 4 は、実測した清酒麹の層内温度分布と計算値とを比較したもので、データポイントは測定値、実線は計算値である。試料麹の Q の値は測定していないが、 35°C における値を $2,500 \text{ kcal/m}^3\text{hr}$ とおいたものが図に示す計算結果である。ただし、Fig. 4 (a)~(c) の各計算ではいずれも左端のデータポイントを T_1 とし、それと 40°C との間で a_1 , a_2 , b_1 および b_2 をきめて用いた。 Q の値が文献値^{2,3)} より小さいのは、試料麹のハゼ回りがあまりよくなかった結果と考えられる。

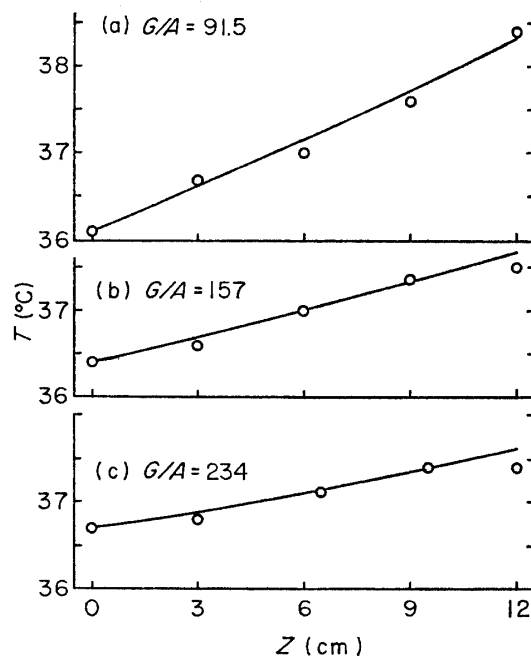


Fig. 4 (a)~(c). Temperature distributions observed (data points) and calculated from Eq. (9) (solid lines).

Values for the calculations:

Q (at 35°C) $= 2,500 \text{ kcal/(m}^3\text{hr)}$

$k_{Ha} = 3.6 \times 10^4 \text{ kg/(m}^3\text{hr}\Delta H)$

The position of the lowest thermometer (c. f. Fig. 1) was taken as $Z=0$.

Fig. 4 の結果は、連続通風製麴において、麴層内の温度分布が(9)式によって説明できることを示すものである。すなわち、通風製麴において堆積厚さ、通風速度に対する層上下の温度差を予知することにより、装置設計および運転条件設定に利用することができる。この結果は、すでに照井ら^{6,7)}によって実験的に求められ、データも整備されているが、本報は、その理論的根拠を明らかにしたものである。

(9)式は、麴堆積層が均一な構造であるとして導かれているので、麴麴など塊状を呈しやすいものには、相応の修正を加える必要がある。

本報では、連続通風下の定常的温度分布を論じたが、正逆、あるいは、間欠通風を行った場合の非定常期間の温度分布については、次報に述べたい。

要 約

1. 連続通風下にある麴堆積層について熱収支を考え、堆積厚さ方向に生ずる温度分布と、通風速度および麴発熱速度との関係式を導いた。
2. 清酒用米麴を用いて測定した通風下の層内温度分布は、上に導いた式による計算値とよく一致した。
3. 麴層の有する物質（水蒸気）移動容量係数の値から、層内を流れる空気の状態は、接する麴粒子と同温度の水とほとんど平衡状態であることを示した。

Nomenclature

- A : cross sectional area of *koji* layer perpendicular to air flow, m^2
- a_1 : constant, $kcal/(m^3hr)$
- a_2 : constant, $kcal/(m^3hr^\circ C)$ } (c.f. Eq. (5))
- b_1 : constant, $kcal/kg-D.A.$ (D.A.: dry air basis)

- b_2 : constant, $kcal/(kg-D.A.^\circ C)$ (c.f. Eq. (6))
- G : flow rate of air, $kg-D.A./hr$
- H : humidity, $kg-water/kg-D.A.$
- i : enthalpy of air, $kcal/kg-D.A.$
- k : constant (c.f. Eq. (11))
- k_{Ha} : volumetric coefficient of mass (water vapor) transfer of *koji* layer, $kg-water/(m^3-layer\ hr\ \Delta H)$
- Q : rate of heat evolution of *koji* layer, $kcal/(m^3\ hr)$
- T : temperature, $^\circ C$
- t : time, hr
- w : apparent density of *koji* layer, kg/m^3
- Z : coordinate along the air flow direction, m
- subscripts:
- 1, 2 : bottom and top of *koji* layer, respectively
- i : surface of *koji* particle

文 献

- 1) 永谷, 三宅: 醸協, **70**, 132 (1975).
- 2) 豊沢, 米崎, 古田: 醸工, **35**, 417 (1957).
- 3) 高野: 第60回酒類講習技術科テキスト, p.p. 93, 94, 日本醸造協会 (1974).
- 4) Calam, C.T., Driver, N., Bowers, R.H.: *J. Appl. Chem.*, **1**, 209 (1951).
- 5) 照井, 芝崎, 望月, 高野: 醸工, **38**, 29 (1960).
- 6) 照井, 芝崎, 望月: 醸工, **36**, 109 (1958).
- 7) 照井, 芝崎, 高野: 醸工, **37**, 534 (1959).

(昭52. 3. 23受付)