茶の透気乾燥法に関する研究 (第2報)*

農林省東海近畿農業試験場茶業部 久保田 濃・中野不二雄

Studies on the Through-Flow Drying of Tea (Part 2)

By Atsushi KUBOTA and Fuzio NAKANO

1. ま え が き

透気乾燥法が、茶の乾燥に適していることはすでに報告^{1,2)}したが、乾燥の機構については明らかにされていない。筆者らは、紅茶揉ねん葉を用いて基礎試験を行い、乾燥機構を追求した。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した装置は第1図のごとくであり、構造の概要は第1報に述べたとおりであるが、次の点を改良した。透気する空気が断熱変化するとみなせるよう容器は厚さ15mmのフェルトで保温した。流量測定 of 正確を期して、低流量用四分円ノズル流量計を設計して取り付けた。A'部はハンドルbを回すことによつて上下に約

50mm移動できる機構で、試料容器は秤Bに糸で接続しており、A'を上げると試料容器はA A'間に圧着され、下げるとA A'と離れ重量の測定ができる。乾燥用空気は電熱器Hで加熱され、排風機FでA部に導かれ、ここで均一な流れとして試料容器に透気させる。

実験はまず、試料容器に実験条件とほぼ同様の茶葉を入れ、希望温度・風速で装置を予熱する。定常状態となつたら、測定すべき茶葉の入つた容器と取り換え、実験を開始する。最初は2分ごとに、実験開始後12分よりは3分ごとに、各部温度計および流量計の指示を記録し、空気流を止め、重量の測定を行った。測定は、重量変化がなくなるまで続け、この値を、この条件における乾燥恒量とした。空気流を止めてから秤量を終るまでの時間は10~15秒である。

第1図 透気乾燥実験装置

- B : 減量測定秤 (最小目盛 0.1 匁)
- S : 試料入れ (直径 200mm ϕ , 深さ 80mm のアルミニウム製, 底部は 60号の真鍮金網, 外部はフェルトにて被包, 重量 273 g)
- T : 水銀温度計
- D : 風量調節用ダンパー
- F : 排風機
- M : 四分円ノズル流量計
- P₁, P₂ : 静圧測定部
- A, A' : 整流のための円筒部
- C : 気密摺動部
- b : 試料入れ圧着ハンドル
- H : 電熱器 2KW 3個, 1KW 2個

3. 測定項目および測定方法

1. 空気温度および湿度

透気直前直後の空気温度は水銀温度計で測定した。温度計の取り付け方法を第2図に示す。温度計は直径15mmのパイプ内に装置される。パイプの一端より真空ポンプで、温度計先端の空気を吸引し、輻射による温度の誤差を防いだ。透気前の空気湿度は、大気湿度と同様とみなした。

第2図 空気温度測定装置

* 茶業技術研究 No. 19, 77~84 (1958) より転載

2. 空 気 流 量

流量が少ないため、標準オリフィスでは流出係数が変化し、不便であるので、低流量用四分円ノズル流量計を製作した。

設計条件

空 気 流 量	Q	30~150 m ³ /hr
最大 差 圧	Δh	150 mmAq
空 気 温 度	t	80 °C
大 気 圧	P	745 mmHg
測定管内径	D	53.4 mm

以上の条件を満足するよう、化学装置便覧⁴⁾、工業測定便覧⁵⁾を参照して、ノズルを設計すると第3図のごとくなる。

第 3 図

このノズルによる流量の計算式は

$$w = 0.01252 mc D^2 \sqrt{\rho \Delta p} \quad \text{kg/hr}$$

ただし $mc = 0.341$

$$\Delta p = (\rho' - \rho) M \quad \text{kg/m}^2$$

M : マノメーター読み m

ρ : 測定空気密度 kg/m³

ρ' : 封液密度 kg/m³

このノズルの流出係数は $Re = 500 \sim 10^5$ の範囲は一定である。測定しようとする流量の Re はこの範囲内にある。

3. 乾 燥 速 度

試料の減量を、最小目盛 0.375 g (0.1 匁) の台秤で測定し、これより乾燥速度を計算した。乾燥速度を表わすには、単位無水重量を基準にとつた。すなわち

$$\text{乾燥速度} = \frac{\text{単位時間蒸発水量}}{\text{無水重量}} \quad \text{g/min} \cdot \text{g}$$

4. 試 料 温 度

0.3 mm の銅・コンスタンタン熱電対の先端に茶葉を

巻き付け、第4図のように、茶層の中に4カ所装置し垂直方向の茶温の変化を測定した。

茶葉の乾燥にとも

ない、茶層の厚さが変わっても、熱電対が細いので、茶葉とともに動き、茶層の中に等間隔の位置を保つた。

5. 試料含水率および平衡含水率

乾燥前後の茶葉を約 10g 秤量びんに取り、約 95 °C の恒温乾燥器に 10 時間入れ、水分をとばして絶乾重量とし、これより計算した。

6. 透気による圧力降下

第1図 P_1 P_2 の箇所の作用圧力を、3 mm ϕ の孔より取り出し、傾斜管微圧計で差圧を読んだ。

7. 試料の厚み

試料の厚さは、詰めかたによっても変り、正確な測定方法がないが、参考のために、1 mm 目盛の鋼尺で乾燥前後を測定した。

4. 試 料

試料は、一番茶在来種手摘葉の紅茶揉ねん葉の第一揉ねんふるい下、第二揉ねんふるい上を用いた。均一な試料を得るため、茶葉 30 kg を伊達式 48 cm 機で揉ねんし、約 1 kg ずつビニルの袋に入れ、約 2 °C の冷蔵庫に貯蔵し、実験のつど取り出し、2 日間にわたって試験した。この間試料は外観・含水率ともほとんど変化はなかった。

紅林氏³⁾によると、含水率の低いところでは、整形操作は乾燥速度にほとんど影響ないと云われているので、この試験で求めた乾燥速度曲線の低含水率の部分は精揉葉の乾燥の場合にも参考にてきるものと思う。

5. 実 験 結 果

実験条件および実験結果の概要を第1, 2表に示す。

1. 空気温度の乾燥速度に及ぼす影響

空気温度を異にする3種の実験結果を第5, 6図に示す。

この図にしたがい、恒率乾燥期間および数種の自由含水率の点における、温度対乾燥速度の関係を第7, 8図に示す。

空気温度の影響は非常に大きく、自由含水率の多い部分ほどその影響は著しい。また3点で、曲線の形をうんぬんするのは危険ではあるが、ほぼ直線的に変化するもようである。

2. 空気速度の乾燥速度に及ぼす影響

空気速度を異にする3種の実験結果を第9, 10図に示す。

第1表 実験結果 (ふるい下)

No	含水率(%)			入口温度	入口湿度	試料厚み (mm)		投入量	空気流量	実験時間	圧力降下 mmAq		乾燥速度(g/min·g) × 10 ⁻²			
	試料	限界	製品	°C	kg/kg	最初	最後	kg/m ²	kg/hr	min	最初	最後	恒率期間	減率期間		
														60%	40%	20%
1	139	91	3.2	80	0.0086	20	10	2.20	77	20	3.6	2.9	25.7	15.2	11.0	6.2
2	141	62	3.3	80	0.0081	40	20	4.27	76	24	7.4	4.0	13.3	10.4	8.6	5.8
3	141	46	2.6	80	0.0078	60	28	6.35	77	44	10.3	7.4	8.9	8.4	7.4	4.8
4	142	62	5.3	60	0.0087	40	19	4.25	78	60	7.9	5.0	8.5	8.0	4.6	2.4
5	142	91	2.0	100	0.0095	40	19	4.27	74	28	7.8	5.4	17.6	15.5	12.7	8.2
6	144	90	4.3	80	0.0110	40	20	4.25	108	28	13.2	8.95	18.4	13.3	10.6	6.4
7	144	51	4.4	80	0.0112	40	19	4.25	44	40	3.1	2.1	7.5		5.9	3.9
8	143	48	4.5	60	0.0103	60	28	6.38	76	70	11.2	7.0	5.5		4.2	2.2
9	142	92	4.7	60	0.0112	20	10	2.17	77	50	3.4	2.3	15.9	8.7	5.1	2.7
10	263		4.2	60	0.0169	40	18	2.36	78	60	6.2	2.8	14.6	6.7	4.6	2.5

第2表 実験結果 (ふるい上)

No	含水率(%)			入口温度	入口湿度	試料厚み mm		投入量	空気流量	実験時間	圧力降下 mmAq		乾燥速度(g/min·g) × 10 ⁻²			
	試料	限界	製品	°C	kg/kg	最初	最後	kg/m ²	kg/hr	min	最初	最後	恒率期間	減率期間		
														120%	60%	20%
1	136		4.5	80	0.0092	20	13	1.55	75	30	1.3	0.9		22.4	11.8	4.8
2	137		4.2	80	0.0099	40	25	3.50	76	28	2.5	1.4		17.2	9.3	4.4
3	135	94	4.4	80	0.0107	60	35	4.60	76	32	4.1	2.0	11.6		7.4	3.6
4	137		6.8	60	0.0110	40	25	3.02	78	50	2.4	1.3		10.8	5.0	2.0
5	137		2.6	100	0.0118	40	26	3.02	74	25	2.6	1.7		11.0	9.4	4.4
6	136		4.5	80	0.0118	40	23	3.05	107	28	4.8	2.5		21.1	11.0	4.7
7	136	115	4.4	80	0.0118	40	25	3.05	45	36	1.0	0.7	9.4		7.3	3.6
8	135	96	3.9	60	0.0112	60	35	4.60	77	70	3.8	1.8	7.8		4.3	1.8
9	135		6.5	60	0.0116	20	10	1.56	77	44	1.4	0.8		15.9	6.2	2.2
10	135	80	2.2	80	0.0121	60	35	4.60	44	50	1.8	1.0	7.1		5.5	2.8
11	134		4.4	80	0.0118	20	10	1.59	44	28	0.6	0.5		15.8	9.3	3.8
12	252		5.2	60	0.0164	40	25	1.70	79	56	3.0	1.8		5.2	3.9	1.8

第5図 乾燥速度曲線 温度の影響

ふるい下, 風量 76kg/hr, 試料厚さ 40mm

この図にしたがつて, 恒率期間と数種の自由含水率の点における空気速度の影響を第11, 12図に示す。含水率の多い部分は, 空気速度の影響が著しいが, 含水率の低下に伴い影響は微弱になる。恒率期間を除いていずれの曲線も上に凸の曲線を描いている。

3. 試料厚さの乾燥速度に及ぼす影響

第7図 空気温度の影響

ふるい下, 風量 76kg/hr,

試料厚さ 40mm

試料厚さを異にした実験結果を第13, 14, 15, 16図に示す。これらの図から第17, 18, 19, 20図に試料厚さと乾燥速度の関係を画いた。

厚さの厚くなるにしたがつて, 乾燥速度は遅くなる。含水率の多い部分ほどこの差が著しく, 含水率の少い部分ではほとんど変わらない。

第6図 乾燥速度曲線 温度の影響
ふるい上, 風量76 kg/hr, 試料厚さ40mm

第9図 乾燥速度曲線 風速の影響
ふるい下, 試料厚さ40mm, 温度80°C

第10図 乾燥速度曲線 風量の影響
ふるい上, 試料厚さ40mm, 温度80°C

第8図 空気温度の影響
ふるい上, 風量76kg/hr,
試料厚さ40mm

第11図 風量の影響
ふるい下, 試料厚さ40mm,
温度80°C

第12図 風量の影響
ふるい上, 試料厚さ40mm
温度80°C

第13図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

ふるい下, 風量 76kg/hr, 温度 80°C

第14図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

ふるい上, 風量 76kg/hr, 温度 80°C

第15図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

ふるい下, 風量 77kg/hr, 温度 60°C

第17図 試料厚さの影響

ふるい下, 風量 76kg/hr, 温度 80°C

第18図 試料厚さの影響

ふるい上, 風量 76kg/hr, 温度 80°C

第19図 試料厚さの影響

ふるい下, 風量 77kg/hr, 温度 60°C

第16図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

ふるい上, 風量 77kg/hr, 温度 60°C

第20図 試料厚さの影響

ふるい上, 風量 77kg/hr, 温度 60°C

第21図 茶葉温度変化

ふるい下, 試料厚さ 40mm, 風量 76kg/hr, 温度 60°C

第22図 茶葉温度変化

ふるい上, 試料厚さ 40mm, 風量 76kg/hr, 温度 60°C

第23図

ふるい下, 試料厚さ 40mm, 風量 108kg/hr, 温度 80°C

第24図

ふるい上, 試料厚さ 40mm, 風量 107kg/hr, 温度 80°C

4. 茶葉温度

第21, 22図に、第1表 No.10, 第2表 No.12 と同じ乾燥条件における茶層内の垂直方向の温度変化を示す。

ふるい下, ふるい上とも、空気入口の茶葉は最初から温度上昇を始めるが、下方の茶葉の温度が昇り始める時間は順次遅れる。最初は下に凸、後に上に凸の曲線を描いて空気温度に近づく。空気出口の茶葉温度が、上昇を開始するのは、実験開始よりふるい下葉で6分、ふるい上葉で2分後であり、この時間は恒率乾燥期間から減率乾燥期間に変る限界点とほぼ一致する。

5. 乾燥収縮に伴う圧力損失の変化

含水率の多い紅茶揉ねん葉を乾燥すると、収縮して第1表に見られるように、容積(試料厚み)は約 $\frac{1}{2}$ に減ずる。これに伴い透気のための圧力損失も変化する。第23, 24図に乾燥時間に対する圧力損失の変化を示す。最初は急激に減少するが、乾燥速度の緩慢化とともに一定値に近づく。

6. 考 察

茶葉は薄層の並流乾燥では、最初から減率乾燥を示すが、透気乾燥では乾燥条件によつて恒率乾燥期間が現われる。これは一見矛盾しているようであるが、次のように考えれば説明できる。透気乾燥における恒率乾燥は、層出口空氣が不飽和の場合と飽和の場合の二つがあるとされているが、茶の場合は後者に属するものと思う。すなわち、前者には HOUNGEN らの研究があり、恒率乾燥期間層全体についての重量減少の割合が一定であり、層全体を通じて材料温度は加熱空氣の湿球温度にあり、空氣入口の先端粒子の温度が、湿球温度より上り始めたとき恒率乾燥が終る。しかし茶の場合、第21, 22図に見るように、上層の茶葉温度は、乾燥の初期より上り始めるが、下層は恒率期間の終期よりゆるやかに上昇を始め

る。これは Katz¹⁰⁾ らの云うように、第25図Aのごとく

蒸発はごく狭い部分で起り、湿润部分がある間は恒率であり、蒸発部分がだいに空氣出口の方へ移動し、層の端に達したとき(第25図B)から減率期間に入る。この蒸発

第25図

部分では減率乾燥を行つている。この場合、出口空氣は飽和なので、恒率乾燥速度は次式で表わされる。

$$R = G (H_s - H_1) \quad \text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

G : 風量 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$

H_s : 出口空氣温度における飽和湿度 kg/kg

H_1 : 入口空氣湿度 kg/kg

第26~29図は、第13~16図における乾燥速度の単位 $\text{g/min} \cdot \text{g}$ を $\text{kg/m}^2 \cdot \text{hr}$ に変えたものであるが、この場合厚みが変わつても、他の条件が同じであれば恒率乾燥速度は変らない。すなわち、空氣は透過し終る前に飽和になつて、層全体では乾燥は行われていないことを裏書きしている。

紅茶荒乾燥のように、水分の多い場合、たとえ短時間にせよ蒸発の行われない部分が存在することは、品質を低下させる原因となるので、なるべく薄層として速かに限界含水率以下まで乾燥し、以後は厚層にて乾燥を行うべきである。たとえば筆者らが設計した二段の網送り型の乾燥機などの場合は、上段の網送り速度を下段の2~4倍にすればよい。

次に減率期間に入つて後の曲線は、並行流乾燥の乾燥

第26図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

第27図 乾燥速度曲線

試料厚さの影響

ふるい上, 風量 76kg/hr, 温度 80°C

第 28 図 乾燥速度曲線 試料厚さの影響

ふるい下, 風量 77kg/hr, 温度 60°C

と相似した曲線を示している。すなわち、最初は上に凹、後は上に凸の曲線を描いて 0 に近づく。熱収支の問題が入ってくるので、厳密には乾燥速度そのものを並行流のものと直接比較はできないが、透気乾燥のほうが飛躍的に早くなる。

7. 要 約

1. 紅茶揉ねん葉ふるい下、ふるい上を用いて、透気乾燥を行い、乾燥の機構を追求した。

2. 温度 60, 80, 90 °C, 風量 44, 77, 108 kg/hr, (風速 0.3, 0.6, 0.9 m/sec), 茶層の厚み 20, 40, 60 mm とし、これらの乾燥条件のもとにおける減量曲線、乾燥速度曲線を求めた。

3. 恒率期間および数種の自由含水率の点において、乾燥温度・風速・層厚みが、乾燥速度に及ぼす影響を示した。

4. 乾燥温度 60 °C, 風速 0.9 m/sec, 厚み 40 mm で乾燥した場合の茶温の変化を、空気入口・空気出口・途中 2 ヲ所にて測定した。

5. 乾燥の機構は、並行流の場合とは大部異なり、乾燥条件により恒率期間が現われる。これは乾燥開始と同時に層全面より蒸発が始まるのではなく、空気入口の比較的薄い層のみで蒸発を開始し、この蒸発層は時間の経過とともに、空気出口に移動し、これが空気出口に達した時に減率期間に入る。減率期間の乾燥速度曲線は並行流のものと相似である。

8. 参 考 文 献

- 1) 久保田 濃 ほか：茶技研, No. 17, 25 (1957).
- 2) 加藤 博, 久保田 濃：茶技研, No. 18, 45 (1958).
- 3) 紅林 勇：東近農試研報 (茶), 1, 77 (1953).
- 4) 大竹伝雄：化学装置便覧 (化学技術社), p. 35 (1954).
- 5) 精機学会, 日本計測学会：工業測定便覧 (コロナ社), p. 578 (1954).
- 6) 平岡正勝：化学機械技術 (槇書店), p. 41

第 29 図 乾燥速度曲線

試料厚さの影響

ふるい上, 風量 77 kg/hr, 温度 60°C

(1957).

- 7) GAMSON, B. W., G. THODOS, and O. H. HOUGEN : Trans. A. I. C. E., 39, 1 (1943).
- 8) MARSHALL, W. R. and O. H. HOUGEN : Trans. A. I. C. E., 38, 91 (1942).
- 9) WILSKE, C. R. and O. H. HOUGEN : Trans. A. I. C. E., 41, 445 (1945).
- 10) ALLERTON, J., L. E. BROWNELL, and D. L. KATZ : Chem. Eng. Prog., 45, 619 (1949).

Summary

The mechanism of through-flow drying of rolled black tea leaves was studied under various drying conditions. The experimental results are shown in figures : (a) The equipment employed in Fig. 1, (b) the drying curves in Figs. 5~20, (c) the distribution of leaf temperature in Figs. 21, 22, (d) the air pressure drop through the leaf bed in Figs. 23, 24.

Under some conditions, a constant-rate drying period was observed in the case of the through-flow drying of tea leaves which was never shown in the parallel drying. During the constant-rate drying, the air left the bed almost saturated, this quick saturation was presumed to take place in a narrow vaporizing zone which gradually moved downward through the wet bed leaving a dry bed above. When the zone reached the bottom of the bed the drying rate began to decrease.

(Sept. 1, 1958)