

合板の乾燥について(接着剤の塗布量と乾燥速度)

福山 万次郎 (木材加工学研究室)

Manjiro FUKUYAMA

Studies on the drying of plywood (The relationship between the spreading of adhesive and the drying velocity)

(1) 前報「ラワン」, 「カバ」両合板の加熱空気中における乾燥特性(乾燥条件と乾燥速度及び蒸発速度, 内部温度の上昇経過, 内部水分の拡散移動等)についての実験結果では, 接着剤塗布量の乾燥速度, 水分拡散に及ぼす影響を明らかにすることが出来なかった。そこで接着剤, 塗布量, 乾燥条件等を変えて, 2~3の実験を行ってみた。本報は, それ等の実験結果の1部である。

尚本実験は, 京都大学梶田教授の御指導によって行ったものであることを附記し, 併せて茲に深甚なる謝意を表する次第であります。

I 供試材料及び実験方法

(A) 供試材料; 富山県産「カバ材」(*Betula maximowicziana* REGEL) の rotary veneer (厚さ0.84mm) を用い, 下記条件で3ply直交合板を製作した。

(a) 接着剤

- 1) urea-formaldehyde resin (以下 U-resin と略称する); 硬化剤として, 濃度10%の NH_4Cl 10%添加。
- 2) urea-formaldehyde resin with extender (以下 Uw-resin と略称する); 増量剤 (extender) として日新製粉製小麦粉を用い, 次の配合割合にした。

| | |
|-------------------------|---------|
| urea-formaldehyde resin | …100 |
| 小麦粉 | …35 |
| 水 | …35 |
| 硬化剤 | …(1)と同様 |

- (b) 接着剤の塗布量; 15, 20, 30, 35, 40, 50, 60g/ft²の7条件
- (c) 圧縮温度; 100°C
- (d) 圧縮圧力; 15kg/cm²
- (e) 圧縮時間; 10min
- (f) assembly time; 30min
- (g) 合板の厚さ; 0.908~0.236cm
- (h) 合板の大きさ; 25×25cm²

(B) 実験方法; 前報と同様に島津製 HT-1 型恒温恒湿槽を一定条件(乾燥条件; (I) $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $19 \pm 2.0\%$, (II) $40 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $33 \pm 2.0\%$) に保持した後, 2ケの spring balance (精度; spring 1 = 5.6mg, spring 2 = 6.4mg) に, 飽水合板 (含水率; 90~103%, 試片の大きさ; $5 \times 5 \text{ cm}^2$, 側面には, 3~4 回尿素系樹脂を塗布) を水平に吊り下げ, 平衡状態(乾燥条件(I); 2.9%, (II); 5.6%) に達する迄の重量減少経過を cathetometer (精度; 1/20mm) で観測した。

尚試片の含水率は, 実験終了後, 100~103°C に調節した thermostat 内で恒量に達する迄乾燥し, 絶乾重量を基準として算出した。

II 実験結果及び考察

上記方法に基いて乾燥した合板の乾燥経過(含水率(u); 乾燥時間(z))の1例はFig. 1, また該試料の log, u : z の関係はFig. 2 の如くで, 前報の場合と全く同様に, 含水率が乾燥初期において直線的に低下する期間(恒率期間)と指数的に低下する期間(減率期間)の存在すること, またFig. 2 から log, u が直線的に低下する期

Fig. 1) Drying process (moisture content (u) : Drying time (z)) of plywood

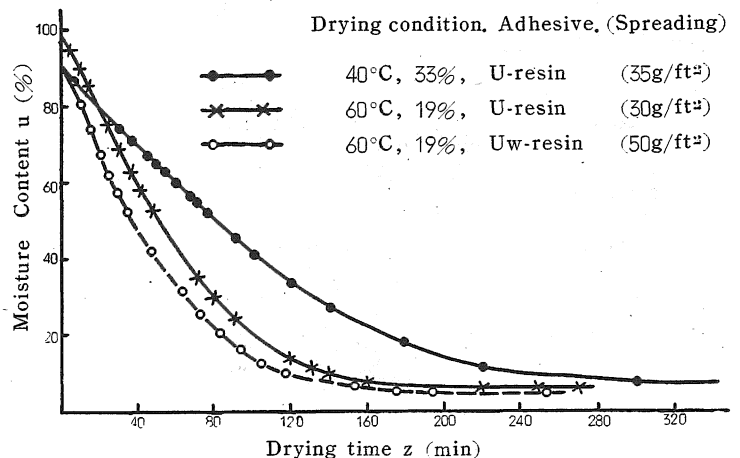
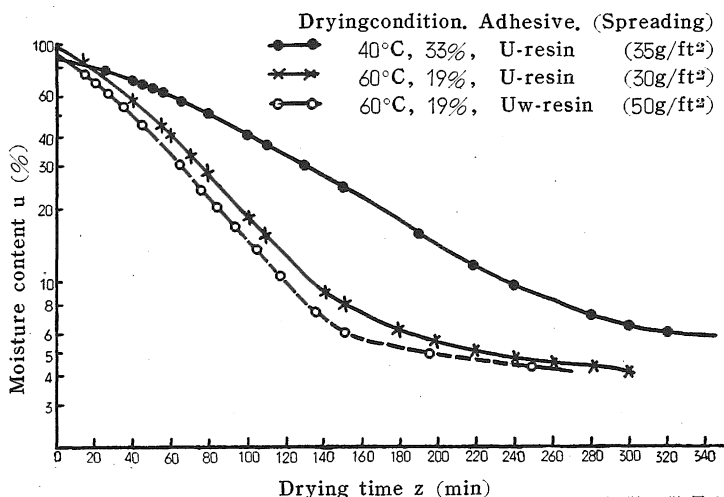


Fig. 2) Relationship between log. u and z



間(減率第1段)と指数的に低下する期間(減率第2段)の存在することが明らかに認められる。限界含水率は、前報の場合と同様に乾燥条件60°C, 19%の場合には55~63%, 乾燥条件40°C, 33%の場合には45~55%, また減率第1段の期間は、限界含水率から含水率約7~12%の範囲に亘ることが認められる。勿論、これ等期間の含水率は、乾燥条件が急激な程また厚さが大きい程高くなることは、論を俟たないところである。

1) 恒率乾燥速度(du/dz); Fig. 1のU:Z曲線の直線部分(恒率期間)の微分値から求めた乾燥速度を接着剤, 塗布量, 乾燥条件について示すと, Table 1の如くで, 表面蒸発主要素の恒率乾燥期間においては, 初期含水率, 厚さが略等しい本試料では, 一定乾燥条件下で, 接着剤の種類, 塗布量に関せず略一定の値なることが理解される。

Table. 1) The drying Velocity (du/dz) of plywood in constant rate of drying

| Spread (g/ft ²) | du/dz (%/min) | | |
|--------------------------------|---------------|----------|----------|
| | 60°C 19% | | 40°C 33% |
| | U-resin | Uw-resin | U-resin |
| 15 | 1.08 | 1.05 | 0.45 |
| 20 | 1.15 | 1.06 | 0.48 |
| 30 | 1.04 | 1.03 | 0.49 |
| 35 | 0.99 | 1.16 | 0.50 |
| 40 | 1.02 | 0.97 | 0.47 |
| 50 | 0.96 | 1.02 | 0.46 |
| 60 | 0.98 | 1.09 | 0.47 |
| 平均 | 1.03 | 1.05 | 0.48 |

2) 減率乾燥速度(du/dz); 内部水分の拡散移動が乾

燥の主要素をなす減率乾燥期間では、Fig. 2のlog u : z, 又Fig. 3のdu/dz : (u-ueq) (但し, ueq=平衡含水率)の関係からも明らかな如く、その乾燥速度(du/dz)は、前報と全く同様に次式で示すことが出来る。

$$du/dz = -K(u - u_{eq})$$

但し, u=或る時点における含水率,

従ってまたuは, 上式の積分値に,

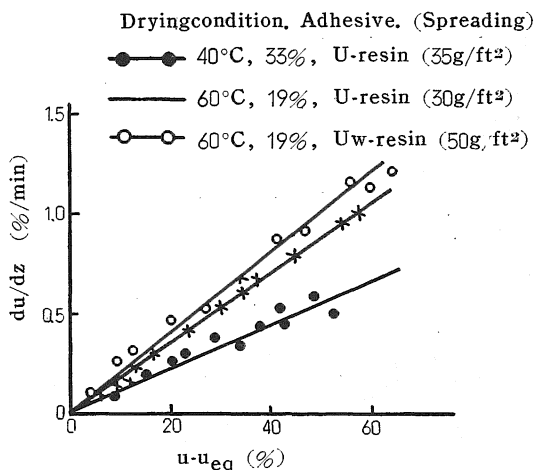
z=0でu=ua(但し, ua=限界含水率)の条件を入れることにより

$$u = u_{eq} + (u_a - u_{eq}) \cdot e^{-k \cdot z}$$

で与えることが出来る。

上式の係数Kは, 乾燥速度従って水分拡散の難易を, また逆数1/Kは, その抵抗を示す1つの尺度と考えることが出来るので, 前報の如く実験値から両者の値を, 各乾燥条件, 接着剤, 塗布量について求めた。Table 2は, その結果を示したものである。

Fig. 3) Relationship between du/dz and (u-ueq)



表からも明らかな如く、乾燥条件, 接着剤, 塗布量が同一な場合でも, K及び1/Kの値には若干の散らばりが認められ, 平均値から直ちにその傾向を推測することには疑問はあるが, 60°C, 19%の乾燥条件では, U-resin Uw-resinの両者とも塗布量の増加に伴って1/K即ち水分拡散に対する抵抗の増加することが認められるが, 40°C, 33%の乾燥条件では, 稍々その傾向は不規則である。而して乍ら, 何れにしても, 各乾燥条件, 各接着剤とも塗布量の増加に伴って水分移動, 水分拡散に対する抵抗が増加すると考えて差支えない様に思われる。

尚Uw-resinの場合, 各塗布量間における1/Kの値の

Table 2) K and 1/K-Value of plywood in falling rate of drying.

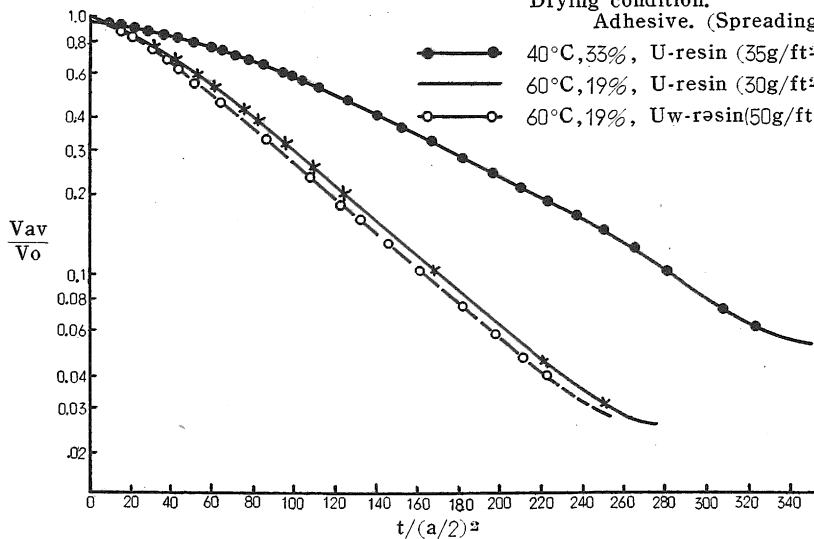
| spread g/ft ² | drying condition 60°C. 19% | | | | | | | | drying condition 40°C. 33% | | | |
|-----------------------------|--|------|-------|----------------|--|------|-------|----------------|--|-------|--------|----------------|
| | U-resin | | | | Uw-resin | | | | U-resin | | | |
| | thick- ness (mm) (×10 ⁻²) | K | 1/K | average 1/K | thick- ness (mm) (×10 ⁻²) | K | 1/K | average 1/K | thick- ness (mm) (×10 ⁻²) | K | 1/K | average 1/K |
| 15 | 2.11 | 2.70 | 37.04 | 41.89 | 2.05 | 2.77 | 37.04 | 41.15 | 2.22 | 0.871 | 114.85 | 112.15 |
| | 2.18 | 2.14 | 46.73 | | 2.11 | 2.19 | 45.26 | | 2.12 | 0.914 | 109.44 | |
| 20 | 2.13 | 2.39 | 41.84 | 50.07 | 2.16 | 2.38 | 42.02 | 39.38 | 2.13 | 1.11 | 90.91 | 93.84 |
| | 2.04 | 1.71 | 58.30 | | 2.14 | 2.72 | 36.74 | | 2.09 | 1.04 | 95.96 | |
| 30 | 2.19 | 1.80 | 55.52 | 55.19 | 2.17 | 2.72 | 36.74 | 40.18 | 2.24 | 1.01 | 98.99 | 96.66 |
| | 2.24 | 1.82 | 54.86 | | 2.13 | 2.29 | 43.62 | | 2.22 | 1.06 | 94.33 | |
| 35 | 2.16 | 1.44 | 69.40 | 67.44 | 2.23 | 2.44 | 40.98 | 43.21 | 2.13 | 0.927 | 107.82 | 106.46 |
| | 2.18 | 1.53 | 65.48 | | 2.15 | 2.20 | 45.44 | | 2.19 | 0.952 | 105.09 | |
| 40 | 2.40 | 1.38 | 72.43 | 75.28 | 2.26 | 2.14 | 46.73 | 43.60 | 2.36 | 0.830 | 120.48 | 114.25 |
| | 2.30 | 1.28 | 78.13 | | 2.23 | 2.47 | 40.46 | | 2.31 | 0.926 | 108.01 | |
| 50 | 2.31 | 1.33 | 75.34 | 68.92 | 2.26 | 2.35 | 42.49 | 43.37 | 2.20 | 0.750 | 133.33 | 117.82 |
| | 2.38 | 1.60 | 62.50 | | 2.14 | 2.26 | 44.25 | | 2.43 | 0.977 | 102.31 | |
| 60 | 2.26 | 1.30 | 76.92 | 75.23 | 2.20 | 2.07 | 48.26 | 50.17 | 2.35 | 0.817 | 122.40 | 122.40 |
| | 2.35 | 1.36 | 73.52 | | 2.22 | 1.92 | 52.08 | | | | | |

差違が、同一乾燥条件のU-resinのそれに比較して少いのは、増量剤が存在する為に着着剤それ自身の結合が弱体化し、塗布量を増加せしめても、それ程耐水効果が増加しないことに起因するものと考えられる。又塗布量40g/ft²以上において、1/Kに不規則な傾向が認められるのは、恐らく圧縮時に接着剤が外部に漏出したことに起因するものと推測される。尚この問題は、次項内部水分の拡散、移動において、再び論ずることにしよう。

3) 内部水分の拡散、移動; Fig.4の如く、 $\log Vav/Vo$: $t/(a/2)^2$ (記号の説明は後述)の關係が近似的に直線と見做し得るので、前報の場合と同様に既知の水分拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ [但し、K=水分拡散率 ($\frac{100\lambda}{ro}$) ($\frac{cm^2}{h \cdot \%}$), λ =拡散係数 ($\frac{g}{cm \cdot h \cdot \%}$)]を用い、各乾燥条件、接着剤、塗布量について水分拡散率Kを計算した。

合板も板材の場合と同様に次の解で示し得られること

Fig. 4) Relationship between Vav/Vo and $t/(a/2)^2$ Drying condition. Adhesive. (Spreading)



は、前報において示したところである。

即ち a = 板の厚さ (cm), u_0 = 初期含水率 (%), u_{eq} = 平衡含水率 (%), $u = t$ 時間乾燥後の断面の含水率 (%), U_m = 平均含水率 (%) とし、 $V_0 = u_0 - u_{eq}$, $V_a = u - u_{eq}$, $Vav = u_m - u_{eq}$ において

境界条件

$$\begin{cases} X = 0 & V_a = u - u_{eq} = 0, \\ & u = u_{eq} \\ X = a & V_a = u - u_{eq} = 0, \\ & u = u_{eq} \\ t = 0 & V_0 = u_0 - u_{eq} \end{cases}$$

を与えるとき、この解は

$$V_a/V_o = 4/\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n^2 (\frac{\pi}{a})^2 K \cdot t} \sin \frac{n\pi z}{a} \quad \text{但し } n = \text{奇数}$$

第一項丈を用いると

$$V_a/V_o = \frac{4}{\pi} e^{-(\pi/a)^2 K \cdot t} \sin \frac{\pi z}{a}$$

又平均含水率 u_m を用いると

$$V_{av}/V_o = 8/\pi^2 [e^{-(\pi/a)^2 K \cdot t} + 1/9 e^{-9(\pi/a)^2 K \cdot t} \dots] \quad \text{(1),(4),(6)}$$

従って V_{av}/V_o ; $K \cdot t / (a/2)^2$ の曲線から水分拡散率 K を求め、前報と同様に小倉氏によって与えられた式 $K_o = K (a/a_o)^{n-2}$ (但し $n = 1.2$ とした) から、厚さ 2.0 mm の K_o を求めた。Table 3 は、その結果を示したものである。

Table からも明らかな如く、乾燥条件、接着剤、塗布量が同一な場合でも K 及び K_o の値には若干の散らばりが認められるので平均値から直ちにその傾向を推定することは困難であるが、乾燥条件 60°C、19% の U-resin の場合には、塗布量の増加に伴って平均値 K_o は減少する傾向にある。而し同一乾燥条件の Uw-resin、及び乾燥条件 40°C、33% の U-resin の場合には明らかな傾向が認められない。この原因は恐らく乾燥条件の緩慢な 40°C、33% においては、中板からの接着層を通じての表板への水分の拡散移動が表板の乾燥に追いつくこと及び塗布量が多い場合には上述の如く圧縮時に接着剤が外部へ漏出すること等に、又 Uw-resin の場合には、上記接着剤の漏出の他に、増量剤の存在によって接着剤それ自身の結合が弱化する為、塗布量の増加が耐水効果をそれ程増加せしめないことに起因するものと考えられる。

Table 3) K and K_o of plywood

| spread g/ft ² | drying condition 60°C 19% | | | | | | | | 40°C 33% | | | |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| | U-resin | | | | Uw-resin | | | | U-resin | | | |
| | thick- ness mm | K ×10 ⁻³ | Ko ×10 ⁻³ | average ×10 ⁻³ | thick- ness mm | K ×10 ⁻³ | Ko ×10 ⁻³ | average ×10 ⁻³ | thick- ness mm | K ×10 ⁻³ | Ko ×10 ⁻³ | average ×10 ⁻³ |
| 15 | 2.11 2.18 | 5.84 5.49 | 5.60 5.13 | 5.37 | 2.05 2.11 | 4.93 4.62 | 4.83 4.44 | 4.64 | 2.22 2.12 | 2.29 2.27 | 2.11 2.17 | 2.14 |
| 20 | 2.13 2.04 | 4.57 5.74 | 4.35 5.65 | 5.00 | 2.16 2.14 | 5.68 4.62 | 4.40 4.38 | 4.39 | 2.13 2.09 | 2.47 2.32 | 2.35 2.24 | 2.30 |
| 30 | 2.19 2.24 | 4.42 5.21 | 4.11 4.76 | 4.44 | 2.17 2.13 | 4.78 4.40 | 4.48 4.19 | 4.34 | 2.24 2.22 | 1.84 2.41 | 1.68 2.22 | 1.95 |
| 35 | 2.16 2.18 | 4.38 5.25 | 4.12 4.90 | 4.51 | 2.23 2.15 | 5.08 4.49 | 4.66 4.24 | 4.45 | 2.13 2.19 | 2.31 2.60 | 2.21 2.42 | 2.32 |
| 40 | 2.40 2.30 | 4.41 5.39 | 3.81 4.82 | 4.32 | 2.26 2.23 | 4.68 4.99 | 4.24 4.57 | 4.41 | 2.36 2.31 | 2.79 2.36 | 2.44 2.10 | 2.27 |
| 50 | 2.31 2.38 | 3.38 4.17 | 3.01 3.63 | 3.32 | 2.26 2.14 | 5.04 4.75 | 4.57 4.50 | 4.54 | 2.22 2.43 | 2.56 2.58 | 2.36 2.21 | 2.29 |
| 60 | 2.26 2.35 | 3.87 3.62 | 3.51 3.18 | 3.35 | 2.20 2.22 | 5.04 5.08 | 4.67 4.71 | 4.69 | 2.35 | 2.19 | 1.92 | 1.92 |

要 約

塗布量、接着剤、乾燥条件を異にした 3ply 「カバ」 直交合板 (厚さ 0.208~0.236cm) の加熱空気乾燥の実験結果を簡単に要約すると次の如くである。

- (1) ベニヤ単板、或いは薄板の乾燥の場合と同様に、恒率、減率第 1 段及び第 2 段の 3 乾燥期間が認められる (Fig. 1, Fig. 2)。
- (2) 恒率乾燥速度 (du/dz) は、接着剤、塗布量に関せず略一定の値を示す (Table 1)。
- (3) 減率乾燥速度 (du/dz) は、 $\frac{du}{dz} = -K(u-u_{eq})$ で与えられ、水分拡散の抵抗の一尺度である係数 $1/K$ は

乾燥条件、接着剤を問わず塗布量の増加と共に増加する傾向を示す (Table 2)。

- (4) 合板内部の水分拡散は板材の場合と同様に $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ で与えられ、水分拡散率 K は、乾燥条件 60°C、19% の U-resin (urea-formaldehyde resin) の場合には塗布量と共に減少する傾向を示すが、他の条件の場合には明らかな傾向が認められない (Table 3)。

参考及び引用文献

- (1) 福山、梶田：木材学会誌 2 巻 4 号 p 168~173 1956
- (2) 全上：木材研究 13 号 p 214~223 1954

- (3) 押田勇雄：蒸発，乾燥
 (4) 満久：木材研究 6号 p51~70 1951
 (5) 全上： " 13号 1951
 (6) 小倉：林試報告 42 (1949) 45 (1950) 51 (1950) 54 (1952)
 (7) Kollmann, F : Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, p443~455 1951
 (8) Keylwerth, R : Holz als Roh- und werkstoff, 10-3 (1952), 11-1 (1953)

Summary

I made the experiment on the relationship between the spreading of adhesive and drying Velocity of plywood under the constant drying condition (60°C, 19% and 40°, 33%). Plywoods used are as follows: I) Veneer; birch-wood (thickness 0.84mm). II) construction; crossbanding plywood (3ply) III) adhesives; a) urea-formaldehyde resin (U-resin) b) urea-formaldehyde resin containing extender (Wheat flour) (U-resin). III) Spreading : 15, 20, 30, 35, 40, 50 and 60 g/ft² V) Pressure : 15kg/cm² VI) Press temperature; 100°C VII) Press Period : 10min VIII) assembly time ; 30min IX) Specimen of plywood ; 25×25(cm²), thickness ; 0.208~0.236cm

Test pieces of about 5×5(cm²) were coated with urea-formaldehyde resin to prevent the drying from four-side faces and then soaked until saturated (initial moisture content ; 90~103%).

Results obtained are as follows

(I) The drying process (moisture content u : drying time Z) of plywood are shown in Fig 1 and the relationship between $\log u$: Z in Fig. 2. From these facts we can obviously recognize three periods of drying ; constant, first and second

stage of falling rate of drying.

(II) We could not recognize the relationship between the drying velocity (du/dz) in constant rate of drying and the spreading, the adhesive of plywood (Table. 1)

(III) As the results of Fig 1~3, the drying Velocity (du/dz) in falling rate of drying was given by the following formula ;

$$du/dz = -1/k (u - u_{eq})$$

Coefficient K and its reciprocal $1/k$ are given in Table 2. The value of $1/k$ was decreasing corresponding to increasing of spreading of adhesive in each drying condition.

(III) The relationship between the Vav/Vo ($Vav = um - ueq$, $Vo = uo - ueq$, $Um =$ average moisture content, $ueq =$ equilibrium moisture content, $uo =$ initial moisture content) and $\frac{t}{(a/2)^2}$ ($t =$ drying time, $a =$ thickness of plywood) are shown in Fig. 4. The moisture diffusivity K was decreasing corresponding to increasing of spreading of urea-formaldehyde resin under the drying condition 60°C, 19%, but this relation was irregular under other conditions.