

# エリクセン試験により得られる荷重・変位曲線の定量解析

弘前大学 大学院理工学研究科  
准教授 紙川 尚也  
(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018008-B2)

キーワード：張出し加工性，エリクセン試験，初等解析

## 1. 研究の目的と背景

薄板のプレス加工における加工性の指標の一つに張出し性があり、張出し性を評価する最も一般的な手法はエリクセン試験<sup>1)</sup>である。エリクセン試験とは、ダイスとしわ押さえとの間に締め付けた板状試験片に対して、球状の端部を持ったパンチを押し込み、板厚を貫通する割れが発生するまで押し込んだ時のパンチの移動距離をエリクセン値として薄板の張出し性を評価する方法である。

日本産業規格 (JIS) では、板幅が 90 mm 以上の比較的大きな寸法の板状試験片を用いて、直径 20 mm の球形パンチによりエリクセン試験を行うことを標準としているが、板幅の小さい試験片であっても、パンチ直径や試験片板厚を小さくすることで試験は実施可能である。しかしながら、異なる直径のパンチまたは異なる板厚の試験片を用いて得られるエリクセン値は、標準試験片を用いて得られるエリクセン値とは当然異なるため<sup>2,3)</sup>、条件の異なる試験により得られたエリクセン値を直接比較できないという問題点があった。

本研究は、異なるパンチ直径および試験片板厚を用いて得られるエリクセン値を一義的に評価する手法の確立を目指して立案されたものである。プレス加工用低炭素鋼板に対して、パンチ直径および試験片板厚を種々変化させ

た条件でエリクセン試験を行い、得られた荷重・変位曲線を定量的に解析することにより、エリクセン試験によって評価されるエリクセン値の物理的意味を理解を試みたので、その結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

本研究では、代表的な実用プレス成形用軟鋼板である SPCE 薄板材を用いて実験を行った。板厚 ( $t_0$ ) が 1 mm、0.8 mm、0.6 mm、0.5 mm の SPCE 鋼板を実験に供した。いずれの場合も、フェライト単相の完全再結晶組織を有する冷間圧延・焼鈍材であり、平均結晶粒径は約 20  $\mu\text{m}$  であった。

### 2.2 エリクセン試験

#### 2.2.1 試験装置

万能試験機に設置可能なエリクセン試験装置を作製し、実験に用いた。図 1 にエリクセン試験装置の外観写真と構成図を示す。装置は、パンチ (punch)、ダイス (die)、しわ押さえ (blank holder)、4 本のコイルばね (coil spring) と他の支持部品から成る。この装置では、板状試験片はダイスとしわ押さえの間に挿入され、4 本のコイルばねはばね押さえ (spring holder) と天板 (top plate) の間に挿

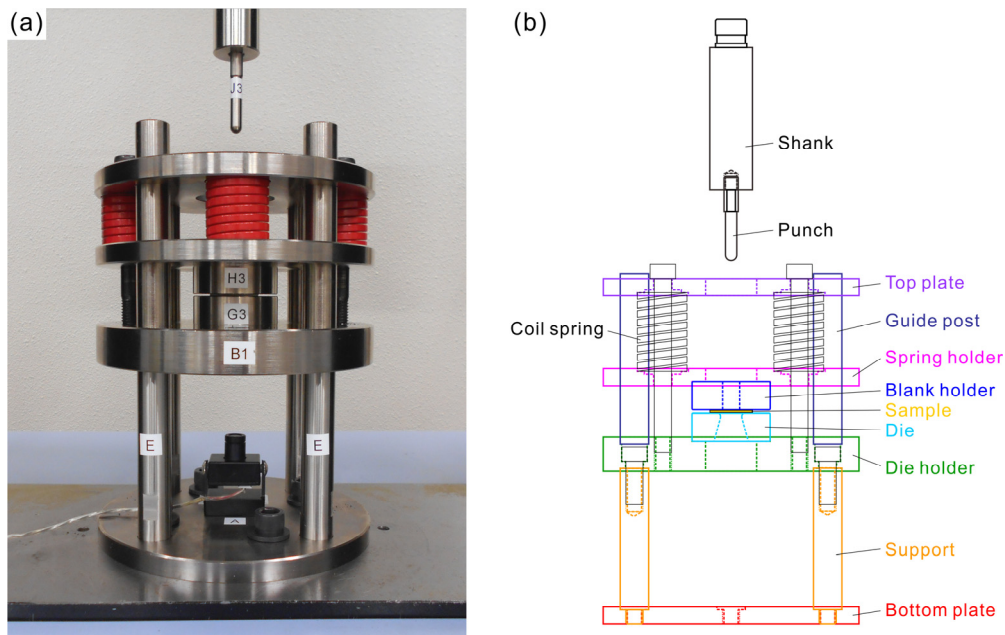


図 1 エリクセン試験装置の (a) 外観写真および (b) 全体構成図。

入されている。さらに、天板とダイス押さえ (die holder) は 4 本のボルトで連結されている。4 本のボルトを締め付けることによって天板が降下してコイルばねが圧縮され、コイルばねに反発力が発生する。これにより、ダイスとしわ押さえの間に挿入した板状試験片を大きな締め付け力で固定することができる。

### 2・2・2 試験条件

エリクセン試験により評価される張出し加工性に及ぼすパンチ直径 ( $d_0$ ) の影響を明らかにするために、パンチの直径を種々変化させ、さらにそれに伴い、ダイス、しわ押さえの寸法も種々変化させた。図 2 に治具および試験片の模式図を示し、表 1 にそれらの寸法をまとめている。JIS では、板幅 90 mm の標準試験において、パンチ直径 20 mm、ダイスの内径 27 mm、しわ押さえの内径 33 mm の試験治具を使用することが規定されている。本実験では標準試験に加えて、直径 15 mm、8 mm、5 mm のパンチを用いた微小試験治具による実験も行った。このとき、標準試験用治具の寸法と相似形になるように、パンチ、ダイス、しわ押さえの寸法を設計した。

板状試験片の板幅は、パンチ直径に応じて変化させた。試験片板厚は、1 mm から 0.5 mm に種々変化させて実験を行った。パンチと接触する試験片表面にグラファイトグリースを塗布した後、板状試験片をダイスとしわ押さえの間に挿入し、約 10 kN の締め付け力で固定した。板状試験片に対して、上部から球形パンチを押し込み、エリクセン試験を実施した。試験中、装置下部に設置された CCD カメラにより板状試験片の外側表面を観察し、板厚を貫通する割れが明確に確認できた時点で試験を終了した。試験中、荷重と変位のデータを記録し、後の解析に用いた。

### 2・3 貫通割れの観察

一般に、エリクセン試験における貫通割れの発生は、試験中の試験片表面を目視することにより確認される<sup>1)</sup>。本実験において、パンチ直径 20 mm および 15 mm の実験では、貫通割れのサイズが比較的大きいため、目視による検出は容易である。一方で、パンチ直径 8 mm および 5 mm の実験においては、貫通割れのサイズが小さく、目視での検出は容易ではない。そこで、本研究においては、エリクセン試験により得られる荷重・変位曲線の形状から貫通割れの発生を推定することを試みた。そのため、貫通割れの形成と荷重・変位曲線の関係について調べた。荷重・変位曲線の任意の位置においてエリクセン試験を中断した試料を作製し、実体顕微鏡により貫通割れの形成過程を調べた。

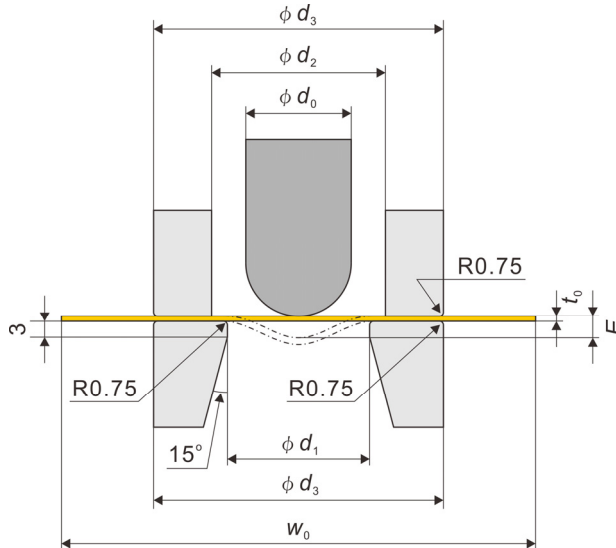


図 2 エリクセン試験に用いた試験治具と試験片の模式図。

表 1 エリクセン試験に用いた板状試験片および試験治具の寸法表。

Symbol	Unit	Designation	Tool and test piece dimensions, punch speed and the definition of Erichsen cupping index			
$d_0$	mm	Diameter of the spherical end of the punch	20	15	8	5
$d_1$	mm	Inside diameter of the die	27	21	11	8
$d_2$	mm	Inside diameter of the blank holder	33	18	10	8
$d_3$	mm	Outside diameter of the die and blank holder	55	55	55	55
$w_0$	mm	Width of the test piece	90	60	30	30
$t_0$	mm	Thickness of the test piece	0.5-1	0.5-1	0.5-1	0.5-1
$v_p$	mm/min	Punch speed	3.0	3.0	1.0	1.0
$E$	mm	Erichsen cupping index	The displacement of the punch until when a crack appears through the full thickness of the test piece.			

## 2・4 板厚分布測定

エリクセン試験中に生じる貫通割れの形成過程をさらに詳細に明らかにするために、荷重・変位曲線と板厚分布の関係についても調べた。荷重・変位曲線の任意の位置においてエリクセン試験を中断した試料を作製した。エリクセン試験中断材を切断し、試験片中央を通る断面を観察面となるように機械研磨により仕上げた。試験片断面を実体顕微鏡により写真撮影し、得られた断面写真を元に板厚分布を測定した。

## 3. 実験結果

### 3・1 荷重・変位曲線と貫通割れ形成の関係

荷重・変位曲線と貫通割れ形成の関係を明らかにするために、エリクセン試験中断材の作製を行った。図3に荷重・変位曲線と対応するエリクセン試験中断材 ( $d_0=8$  mm、 $t_0=1$  mm) の外観写真を示す。試験開始後、荷重は緩やかに増加していくが、最大荷重を示した後、急激に荷重が低下している。これがエリクセン試験により得られる典型的な荷重・変位曲線の形状である。

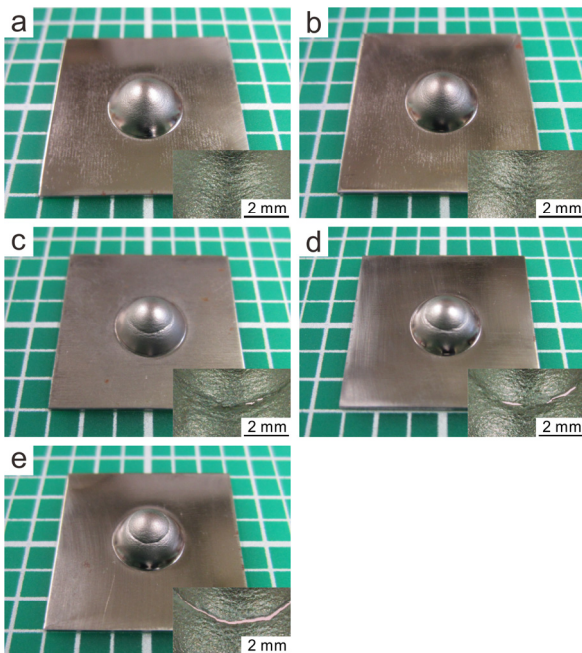
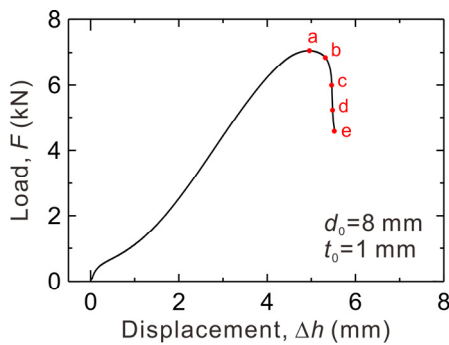


図3 荷重・変位曲線とエリクセン試験中断材の外観写真 ( $d_0=8$  mm、 $t_0=1$  mm)。

対応する試験片の表面観察を行ったところ、最大荷重点 (a 点) およびその直後の点 (b 点) においては、試験片表面には貫通割れは確認できないが、荷重が急激に低下する点 (c 点) において明瞭なくびれ変形が観察され、貫通割れが形成されている様子が観察される。さらに試験が進行すると (d 点、e 点)、さらに荷重の低下が生じるとともに、貫通割れの連結が生じ、より大きな貫通割れへと成長している様子が見て取れる。他のパンチ直径の実験においても同様の観察を行ったところ、いずれも図3に見られた結果と良く似た結果が得られた。

以上の観察より、荷重・変位曲線における荷重の急激な低下が貫通割れの発生により生じていることが実験的に確認できた。そこで本実験では、荷重・変位曲線において、荷重の減少速度が最大となる点を貫通割れの発生点と定義してデータ解析を進めた。

### 3・2 荷重・変位曲線と板厚分布の関係

荷重・変位曲線と板状試験片の変形過程との関係をさらに詳細に明らかにするために、荷重・変位曲線と板厚分布の関係を調べた。エリクセン試験中断材の試験片断面を観察し、板厚分布の変化を調べた。図4に  $d_0=20$  mm、 $t_0=1$  mm の結果と  $d_0=8$  mm、 $t_0=1$  mm の結果をそれぞれ示す。板厚分布のグラフはいずれも、変形前の板状試験片の中心からの位置を横軸としてプロットしている。 $d_0=20$  mm、 $t_0=1$  mm (図4a) および  $d_0=8$  mm、 $t_0=1$  mm (図4b) の板厚分布は、いずれも定性的に非常に良く似ている。試験の進行により変位が増加するとともに、板厚の減少が生じている。荷重が徐々に増加している a 点、b 点においては板厚の減少は比較的均一に生じているのに対して、最大荷重点である c 点では、板厚の減少が局所的に生じていることがわかる。すなわち、最大荷重点においては、くびれ変形の発生が既

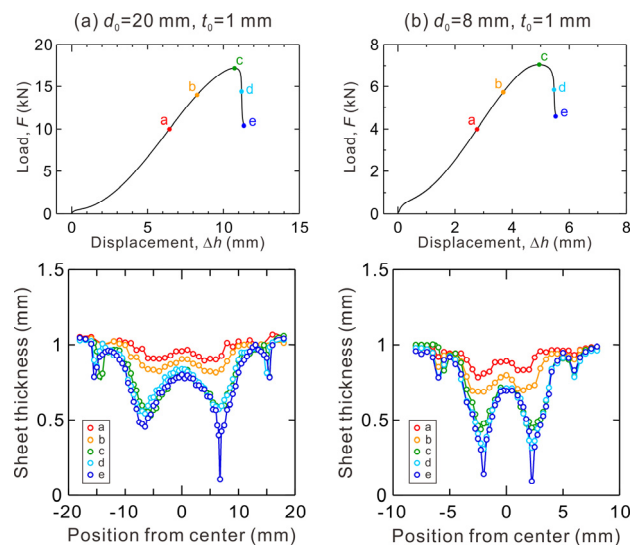


図4 荷重・変位曲線とエリクセン試験中断材の板厚分布。(a)  $d_0=20$  mm、 $t_0=1$  mm、(b)  $d_0=8$  mm、 $t_0=1$  mm。

に生じている。最大荷重点を越えると、変形はほぼくびれ変形領域にのみ集中し、貫通割れが発生していることが明らかになった。

### 3.3 荷重・変位曲線に及ぼすパンチ直径と試験片板厚の影響

パンチ直径および試験片板厚の種々異なる条件でエリクセン試験を行い、荷重・変位曲線を得た。図5にパンチ直径の影響、図6に試験片板厚の影響を比較した図をそれぞれ示す。図では、試験開始から貫通割れ発生点までのパンチの押し込み変位を横軸としてプロットしている。すなわち、それぞれの荷重・変位曲線における最大変位がエリクセン値に対応している。図に示す荷重・変位曲線の形状は、パンチ直径や試験片板厚が異なっても、定性的に非常に良く似ている。しかしながら、荷重と変位は試験条件に大きく依存していることがわかる。本報告では、紙面の都合上、変位の結果のみに着目して議論していく。図5を見ると、パンチ直径が大きいほど、エリクセン値が大きくなっていることがわかる。一方で、図6を見ると、試験片板

厚が大きいほどエリクセン値が大きくなっていることがわかる。

ここで、3.2の観察結果に基づいて、得られた変位のデータを2つに分離して整理してみた。エリクセン試験開始から最大荷重点までの領域では、板厚の減少が比較的均一に進むことから、この範囲の変位を「均一変位」と定義する。一方で、最大荷重点から貫通割れ発生点までの領域では、板厚の減少が著しく不均一になりくびれ変形部で急速な板厚減少が生じて貫通割れが発生することから、この範囲の変位を「局部変位」と定義する。すなわち、試験開始から貫通割れ発生点までの変位を全変位 ( $E_{total}$ ) とすると、均一変位 ( $E_{uniform}$ ) と局部変位 ( $E_{post-uniform}$ ) の関係は以下のように記述できる。

$$E_{total} = E_{uniform} + E_{post-uniform} \quad (1)$$

図7aには均一変位とパンチ直径 ( $d_0$ ) の関係、図7bには局部変位と試験片板厚 ( $t_0$ ) の関係を示している。これより、均一変位は、パンチ直径に比例して増加するが試験片板厚には依存しないことがわかる。一方で、局部変位は、試験片板厚に比例して増加するがパンチ直径の影響は受けないことがわかる。したがって、均一変位と局部変位を以下のように表すことができる。

$$E_{uniform} = \alpha d_0, \quad E_{post-uniform} = \beta t_0 \quad (2)$$

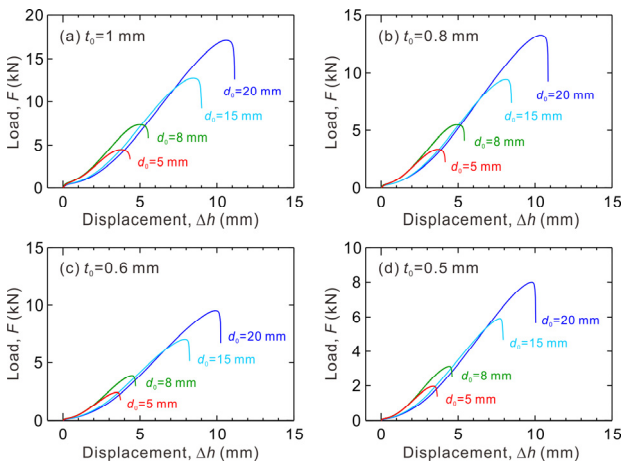


図5 荷重・変位曲線に及ぼすパンチ直径の影響。

(a)  $t_0=1$  mm、(b)  $t_0=0.8$  mm、(c)  $t_0=0.6$  mm、(d)  $t_0=0.5$  mm。

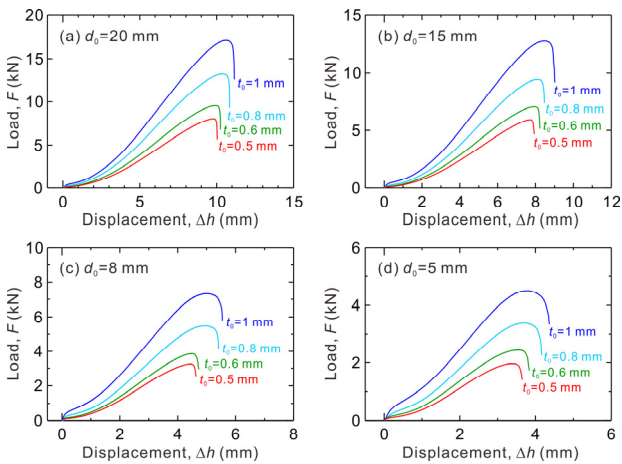


図6 荷重・変位曲線に及ぼす試験片板厚の影響。

(a)  $d_0=20$  mm、(b)  $d_0=15$  mm、(c)  $d_0=8$  mm、(d)  $d_0=5$  mm。

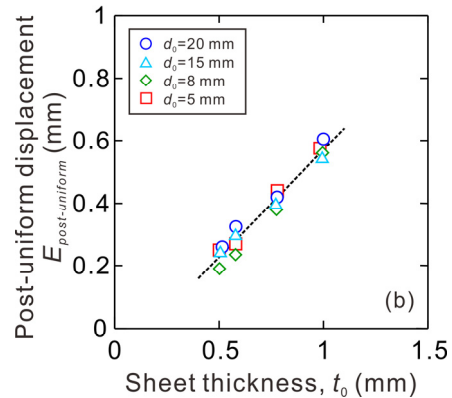
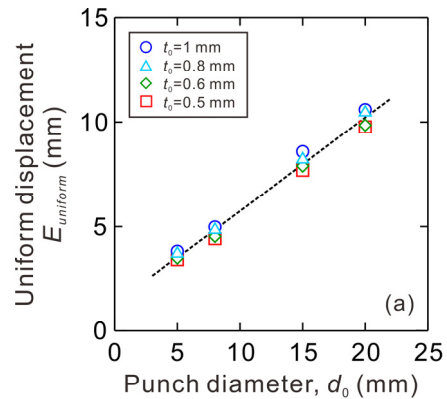


図7 (a)均一変位とパンチ直径の関係、(b)局部変位と試験片板厚の関係。

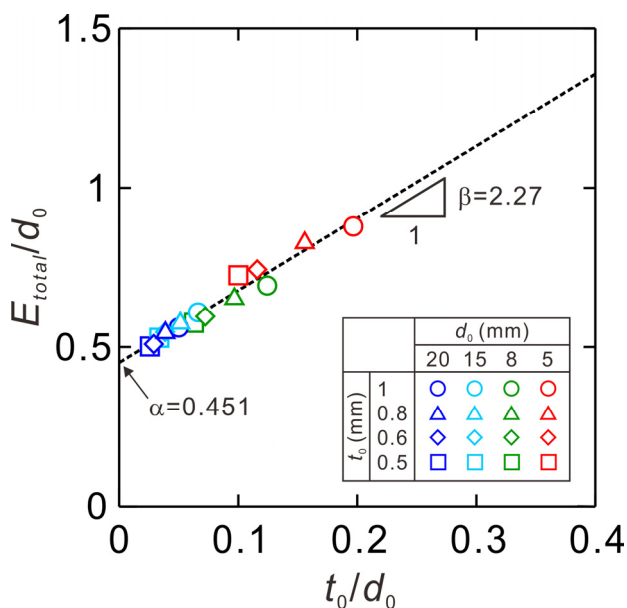


図8 パンチ直径で規格化したエリクセン値と試験片板厚とパンチ直径の比の関係。

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  は材料の力学特性に依存する定数である。(1)式と(2)式から、全変位、すなわちエリクセン値は以下のように記述できる。

$$E_{total} = \alpha d_0 + \beta t_0 \quad (3)$$

さらに、(3)式の両辺をパンチ直径  $d_0$  で除することにより次式が得られる。

$$\frac{E_{total}}{d_0} = \alpha + \beta \frac{t_0}{d_0} \quad (4)$$

(4)式は、パンチ直径で規格化したエリクセン値が、試験片板厚とパンチ直径の比に比例して増加することを意味している。この考え方に基づいて、実際に本実験で得られた結果を整理すると図8のようになる。確かに予想通り、すべての点が一本の直線の関係でよく説明できることが明らかになった。このことは、任意のパンチ直径および試験片板厚を用いたエリクセン試験により得られるエリクセン値を予測することが可能であることを意味している。

#### 4. 結論

本研究では、パンチ直径と板厚を種々変化させたエリクセン試験を行い、得られる荷重・変位曲線の定量解析を試みた結果、任意のパンチ直径と板厚を用いたエリクセン試験により得られるエリクセン値の予測式を得ることに成功した。

なお、本研究では、これ以外にもいくつかの重要な成果を得ているが、それらの結果は紙面の都合上、本報告書には掲載していない。詳細については、既報(文献4)を参照されたい。

#### 謝 辞

本研究は、天田財団による2018年度一般研究開発助成(交付番号AF-2018008-B2)の支援を受けて遂行されたものである。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) JIS Z 2247:2006. エリクセン試験方法.
- 2) T. Yoshizawa: *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, 1953, vol. 19, pp. 7-14.
- 3) T. Yoshizawa: *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, 1957, vol. 23, pp. 225-229.
- 4) N. Kamikawa and H. Morino: *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 50, pp. 5023-5037.