

引張伸び率に関する一考察

山 本 晴 生*

Some Theoretical Approaches on Tensile Elongation

by Haruo Yamamoto

One of the most important problems in the field of the tension test of materials is shape and dimension of specimens. Tensile strength and tensile elongation of materials are varied by shape and dimension of specimens. In order to determine shape and dimension of specimens, the author performed the following experiments.

For gauge length, this is $L_0 = K\sqrt{A_0}$

Case(1): In bar specimens

$K=2, 2.5, 3.3, 4, 5, 5.65, 10$, (K : arbitrary constant)

$d=12, 16, 20, 22\text{mm}$ (d : diameter)

A_0 =initial cross sectional area of tension specimens.

Case(2): In plate specimens

$K=2.5\sim 80$

$W=15\text{mm}$ (width)

$t=1.00, 3.20\text{mm}$ (thickness)

As a result, for the test on plate specimens, the ϵ and $(1/\sqrt{A_0}/l_0)$ diagram showed Oliver's law of similarity. On the other hand for the bar specimens, the "skew" appeared in the ϵ and $(1/\sqrt{A_0}/l_0)$ diagram near by $(1/\sqrt{A_0}/l_0)=1.0$.

1. 緒 言

金属材料が構造物として用いられるとき、構造物が十分に機能を持たす設計をするための前提には、その材料の機械的性質のうち特に引張強さや伸び率を正確に知る必要がある。引張強度に及ぼす諸因子として、静的な大気条件下で次の三点すなわち、ひずみ速度、試験温度、試験片形状（寸法効果）を考える。このうち特に引張試験片形状については、わが国では JIS 規格をはじめ世界各国においても種々の形状が規定されている。現状においては、国際規格の点から ISO による規格統一の傾向にある。従来用いられている JIS の引張伸び率の Barba の方法から ISO が提案している Oliver 式を用いて伸び率を求めることを換算伸びと呼び、これからこのような方法が使用される可能性は大きくなっていく。したがって、これらの規格に関連性を得るためにオリバーの伸び式を基に、一般形状と基準形状との間に換算伸び率を用いて考察した。

* 理工学部機械工学科助手 材料力学

2. 記 号

W : 平行部の板幅 (mm)	t : 平行部の板厚 (mm)
L_0 : 標点間距離 (mm)	d : 平行部の直径 (mm)
A_0 : 平行部の断面積 (mm ²)	$K: L_0/\sqrt{A_0}$
φ : 全伸び率 (%)	l_0 : 破断部の左右にとった元の長さ (mm)
ϵ : ひずみ	ϵ_t : 全ひずみ
ϵ_s : 基準形状のひずみ	σ_s : 降伏点 (kg/mm ²)
オリバーの式: $\epsilon_0 = m(\sqrt{A_0}/l_0)^n$	σ_B : 引張強さ (kg/mm ²)
m, n : 材料によって決まる定数	n' : 折れ点より右側での直線の傾き
n : $\sqrt{A_0}/l_0 < 1$ の範囲での直線の傾き	

3. 引張試験結果に影響を及ぼす諸因子

ひずみ速度や試験温度に対する引張強さや伸び率は、その関係には単調ではなく相互に依存されることは多く研究結果からいえることである。

一般に鋼は試験温度が高くなるにしたがって強度は低下し延性は増大する。温度が低くなると、強度は大きくなり、延性は小さくなるという傾向にある。

ひずみ速度については、流動応力や引張強さおよび伸び率に対する影響はひずみ速度が増加するにともない引張強さは増大する¹⁾。

試験片の形状について、一般的には次のことを考える必要がある。

(a) 平行部の長さ

平行部の長さは JIS により数多くが規定されている。当然ながら、試験片の形状・寸法により引張強さや伸び率は大きく影響を受ける。一般に平行部の長さは標点距離に 10~20 mm を加えた値である。

また、特に伸び率は試験片のつかみ部の拘束の大きさに関係し、試験片のつかみ部の拘束により長さ方向のひずみ分布は図 1 のようになり、両端ではつかみ部の拘束によりひずみが小さくなる。つかみ部の拘束については吉田²⁾ らの実験結果がある。

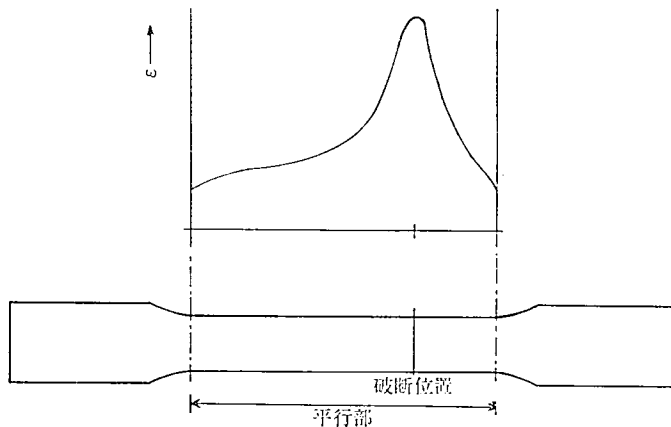


図 1 引張試験によるひずみ分布

(b) 断面形状

引張強さ及び伸び率に及ぼす断面形状の影響についてはあまり研究がなされておらず、定量的な結果の検討はほとんど行なわれていない。試験片の形状が円形断面の方が矩形断面より、測定値にばらつきが少ないということが報告されている。その原因は矩形断面では板幅方向と板厚方向との変形量が幅と厚さの比によってくびれの発生及び破壊様相が相違することにある。アルミニウム合金については佐藤³⁾の研究結果がある。

(c) テーパーについて

ASTM 規格では標点距離の中央部と端部では断面直径に1%の相違が許されているが、これは破断が試験片中央で生ずるようにテーパーをつけたもので、このような試験片を用いて Kula⁴⁾らは軟鋼について実験した結果、標点距離間でのひずみ分布は一様性がなくなり、一様伸びは平滑材より16%以上も低くなっていると報告している。

この試験片は切欠き材であり平滑材でないため、切欠き脆性の影響があることを意味する。

(d) 標点距離

試験片を引張試験すると軟鋼であれば上降伏点までは応力とひずみはほぼ比例関係にあり、その後軟鋼特有の降伏現象を生じ加工硬化され応力とひずみは $\sigma = c\epsilon^n (n < 1)$ の関係で変化し、最大荷重まで外見上一様伸び変形をする。その後ある一部が縮みを起し(局部収縮)破断される。

このように試験片の全伸びは一様伸びと局部伸びの和で表わされる。一般に工業材料では標点距離が短くなるにつれて、局部伸びの占める割合が大きくなるために、全伸びは大きくなる。

絞り率や引張強さは断面のみに依存され標点距離の変化にはあまり関係がない。

標点距離と断面積とによって全ひずみの変化を表現する代表的な式として次の2つがある。この2つの式において L_0 を l_0 と置換えると破断後のひずみ分布を表現する式になると考えられる。

(1) Unwin-Barba の式

$$\epsilon_B = a + b \sqrt{A_0}/L_0 \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

(a, b 材料定数)

(2) Oliver の式

$$\epsilon_0 = m(\sqrt{A_0}/L_0)^n \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

Unwin-Barba の式や Oliver の式を用いて円形断面および矩形断面を有する試験片については著者⁵⁾の他大野⁶⁾、大谷⁷⁾、Fenner⁸⁾らによって研究がなされている。

(c) 断面積について

堀川⁹⁾は SM50N 材について正方形断面の試験片について実験した結果、 $\sqrt{A_0}$ が 6mm のものと 24mm のものと比較したもので伸び率に及ぼす影響は非常に大きいことを指摘している。 $\sqrt{A_0}$ が異なるものについては $\sqrt{A_0}/L_0$ が一定になるものに換算した結果、伸び率は $\sqrt{A_0}/L_0$ の関数になることを表わしている。

引張試験における諸因子を考えてきたが、さらに使用状態として環境条件を考慮する必要がある。また薄板では、採取方向、(加工による異方性等を考慮)、試験片加工方法(加工手段、切削回数、切削温度、寸法精度)¹⁰⁾等を考慮する必要性がある。

4. 試験片と試験方法

試験片に使用した材料は機械構造用炭素鋼の丸棒では、S10C, S15C, S22C, S25C, S45C, S48C 材で平板材では圧延薄鋼板で板厚 $t=1.00$ および $t=3.20\text{mm}$ であり、図2および表1に示す試験片の形状に、機械加工を行なった。

ひずみ速度をほぼ一定の、 $10^{-3}/\text{sec}$ 程度になるように負荷速度を調整しながら実験を行なった。チャックのつかみ位置はつかみ部肩末端から 10mm とした。

JIS 試験片のうち板状試験片に対して $t=1.00, 3.20\text{mm}$ とした時の K の値を表2に示す。

試験片形状及び材質

丸 棒

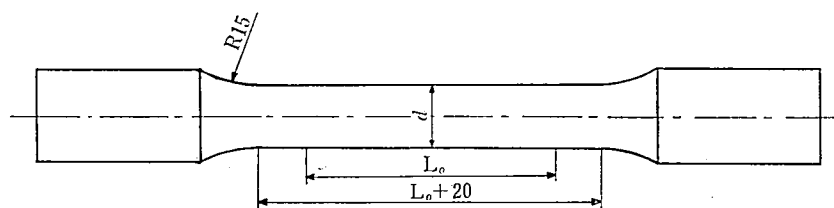


図2(a)

表1(a)

材 質	K	d (mm)	材 質	K	d (mm)
S 10 C	2.	12.	S 15 C	4.	20.
S 25 C	2.5 3.3	16. 20.	S 22 C	5.65	
S 48 C	5. 10.	22.	S 45 C	10.	

平 板

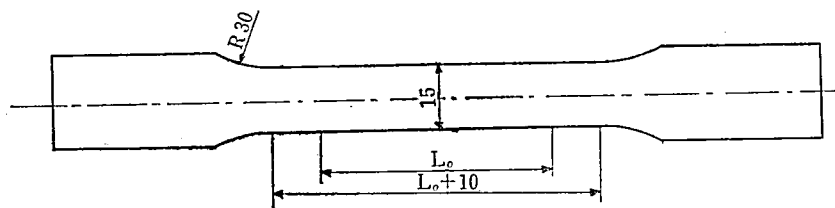


図2(b)

表1(b) 標点間距離 L_0 (mm)

K t	2.5	4	8	14	16	20	30	45	60	80
1.00	10	16	30	54	—	78	116	174	232	310
3.20	18	28	56	—	110	—	208	312	—	—

表2 板状試験片のKの値

JIS 規格 番 号	W	L_0	$K=L_0/\sqrt{A_0}$	
			$t=1.00$ (mm)	$t=3.20$ (mm)
1 A号	40	200	31.6	17.7
	60	200	25.8	14.4
1 B号	25	200	40.	22.4
5 号	25	50	10.	5.59
6 号	15	$8\sqrt{A_0}$	8.	8.
7 号	$W>t$	$4\sqrt{A_0}$	4.	4.
13A号	20	80	17.89	10.
13B号	12.5	50	14.1	7.91
14B号	$W<4t$	$5.65\sqrt{A_0}$	5.65	5.65

5. 引張強度特性に及ぼす試験片形状

引張試験片の平行部直径や平行部板幅が引張強さや降伏点に及ぼす影響は標点距離を種々に変えた試験で L_0 が大きくなるものに小さいものより引張強さが減少することが見られるが、その減少量はわずかであり、ほぼ一定値となる（図3、4、5）。そのことは本実験の他にも多くの研究者によって同じ結果が明らかにされている。しかし全ひずみは試験片の長さによって大変相違し一般に次式(3)で表わすことができる。

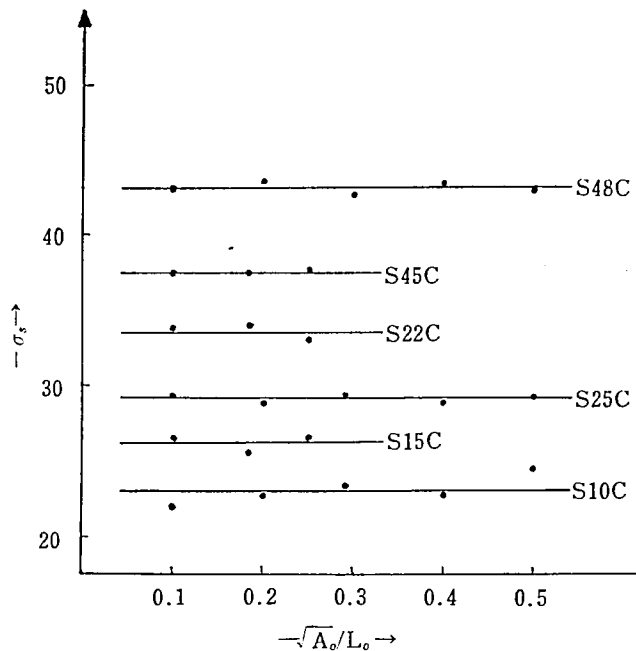


図3 丸 棒

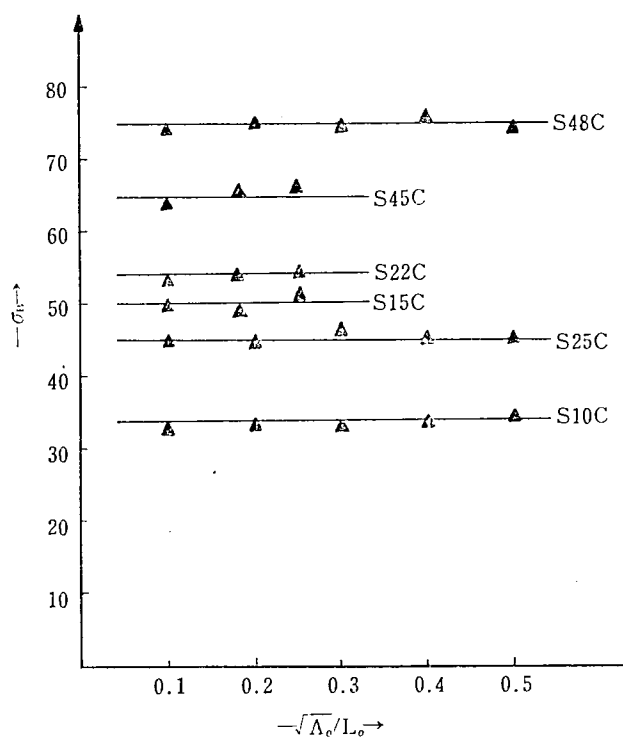


图4 丸 棒

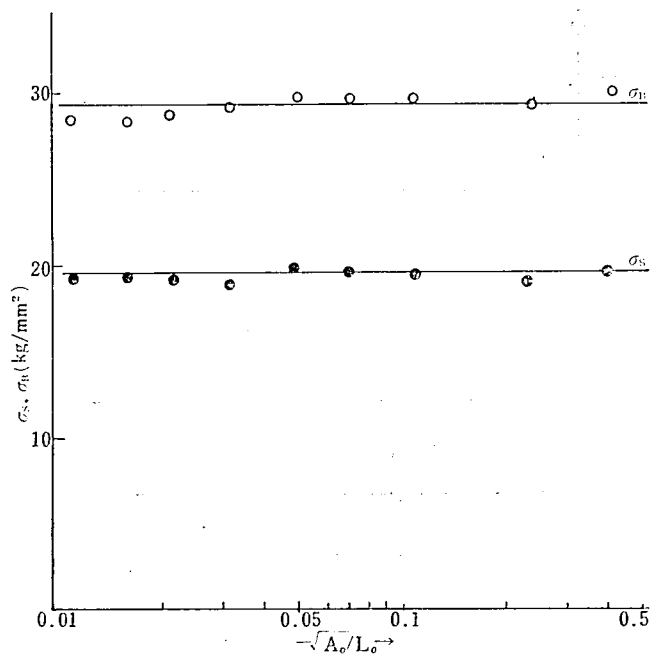


图5 平 板

表 3

材質	係数		
		A	B
平 板		1.08	0.36
S 10 C		0.80	0.34
S 15 C		0.56	0.32
S 22 C		0.61	0.36
S 25 C		0.64	0.32
S 45 C		0.42	0.27
S 48 C		0.45	0.35

$$\epsilon_t = A(\sqrt{A_0}/L_0)^B \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、係数 A 、 B は材料及び試験片形状によって定まるもので、本研究で得られた結果を表3に示す。これより炭素鋼では、 B の平均値は0.35である。

6. 換算伸び率について

任意の標点距離をもつ一般形状に対して伸び率を求める方法を定めることは統一規格の点からも重要である。現状においては、国際規格の点から ISO による規格統一の傾向にある。従来用いられている JIS の引張伸び率の Barba の方法から ISO が提案している Oliver 式を用いて伸び率を求めることを換算伸びと呼び、これからこのような方法が使用される可能性は大きくなって来る。

標点距離 $L_0 = K\sqrt{A_0}$ とするとき、ISO が推奨する K の値は $K_s = 5.65$ でこれに対する全ひずみ ϵ_s を求める式を Oliver の式を用い、丸棒について導いて見る。

$$\text{標点距離 } L_{0s} = K_s \sqrt{A_0} = 5.65 \sqrt{\frac{\pi}{4} d^2} = 5d \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。しかし、板状試験片においては K を一定にするための条件を満たすことは余りにも煩雑である。何故ならば、 L_0 と W と t との一つを一定にして、他の2つをそれに応じて変化させる必要があるからである。

K を任意にとった一般形状で得られた全ひずみ ϵ_t を基準形状 (K_s) に Oliver の式を用いて換算する式を次の2つの式から求める。

$$\text{全ひずみは } \epsilon_t = m(\sqrt{A_0}/L_0)^n = m(K^{-1})^n \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{オリバーのひずみは } \epsilon_s = m(K_s^{-1})^n \quad \dots\dots\dots(6)$$

この2つの式から m を消去すると、 ϵ_s が求まり

$$\epsilon_s = \epsilon_t / (K^{-1})^n \cdot (K_s^{-1})^n = (K/K_s)^n \cdot \epsilon_t \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで $K_s = 5.65$ とおくと、式(7)は

$$\epsilon_s = (0.177K)^n \cdot \epsilon_t \quad \dots\dots\dots(8)$$

で表わされる。

丸棒についての結果を表4に示す。

平板については表5に示し、その値を図6に $\triangle : t = 1.00\text{mm}$, $\bigcirc : t = 3.20\text{mm}$ で示す。

$K_s = 5.65$ の ϵ_t は $\epsilon_t = 0.58$ である。 ϵ_s との誤差は約14%である。

表 4

材 質	K	K^{-1}	n	ε_t	ε_s
S10C	2.	0.5	0.34	0.61	0.43
	2.5	0.4		0.57	0.43
	3.3	0.3		0.53	0.44
	5.	0.2		0.43	0.42
	10.	0.1		0.35	0.43
S15C	4.	0.25	0.480	0.35	0.30
	5.65	0.17	0.460	0.33	0.33
	10.	0.10	0.450	0.27	0.35
S22C	4.	0.25	0.570	0.37	0.30
	5.65	0.17	0.500	0.32	0.32
	10.	0.10	0.460	0.27	0.35
S25C	2.	0.5	0.32	0.51	0.37
	2.5	0.4		0.47	0.36
	3.3	0.3		0.43	0.36
	5.	0.2		0.37	0.36
	10.	0.1		0.31	0.37
S45C	4.	0.25	0.510	0.30	0.25
	5.65	0.17	0.490	0.26	0.26
	10.	0.10	0.440	0.27	0.29
S48C	2.	0.5	0.35	0.33	0.23
	2.5	0.4		0.31	0.23
	3.3	0.3		0.27	0.22
	5.	0.2		0.24	0.23
	10.	0.1		0.19	0.23

表 5

	K	2.5	4.	8.	14.	16.	20.	30.	45.	60.	80.
	K^{-1}	0.4	0.25	0.125	0.071	0.063	0.050	0.033	0.022	0.017	0.013
$t=1.00$	n	0.456	0.457	0.456	0.425	—	0.416	0.364	0.335	0.368	0.403
	ε_t	0.77	0.64	0.48	0.41	—	0.38	0.35	0.24	0.22	0.23
	ε_s	0.53	0.55	0.56	0.61	—	0.64	0.64	0.48	0.52	0.67
$t=3.20$	n	0.577	0.532	0.498	—	0.488	—	0.418	0.416	—	—
	ε_t	0.73	0.60	0.45	—	0.40	—	0.33	0.28	—	—
	ε_s	0.46	0.50	0.54	—	0.66	—	0.66	0.66	—	—

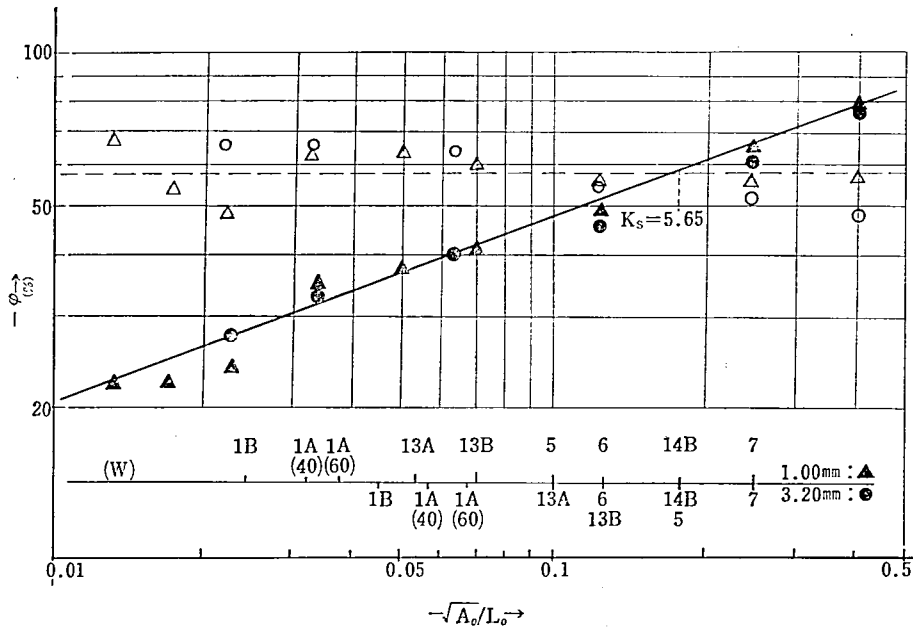


図 6

7. 実験結果及び考察

炭素鋼及び圧延薄板鋼について標点距離 L_0 を種々に変えた試験片について、破断部の左右に等しくとった元の長さを l_0 とするとき、オリバーの式 $\epsilon = m(\sqrt{A_0}/l_0)^n$ を用いて両対数グラフ上に $\epsilon - (\sqrt{A_0}/l_0)$ 線図として実験結果を示す。

丸棒についての結果は図7、平板については図8に示す。丸棒については、図7に示すように、 $\sqrt{A_0}/l_0 = 1.0$ 付近において折れ点が現われるので、 $\sqrt{A_0}/l_0 < 1.0$ の範囲での直線の傾きを n と表わし、表6に示す。

又直径 d を12, 16, 20, 22mmと変化させたときの $\sqrt{A_0}/L_0 = K^{-1}$ が一定のときの実験結果を図9に示す。

実験結果から次のことが考察できる。

- (1) K が一定ならば d が12, 16, 20, 22mmと変化しても材質の変化にかかわらず、全ひずみ ϵ_t (全伸び率), 引張強さ, 降伏点はほぼ一定値を示す。
- (2) 丸棒、平板ともオリバー分布を示すが、丸棒においては $\sqrt{A_0}/l_0 = 1.0$ 付近において、折れ点が現われる。すなわち、局部収縮部におけるひずみ分布はオリバー分布をせず、その分布を考えるためには、他の考え方をしなければならない。その原因については次節でさらに考察を加えることにする。
- (3) 丸棒における換算伸び率の計算結果(表4), 実験値との誤差は非常に少ない。しかし、平板においては特に標点距離 L_0 が大きいもの ($K^{-1} = \sqrt{A_0}/l_0$ が小さいもの) は、規格試験片 ($K_s = 5.65$) に対して誤差が大きいのは、板厚の影響があるためである。

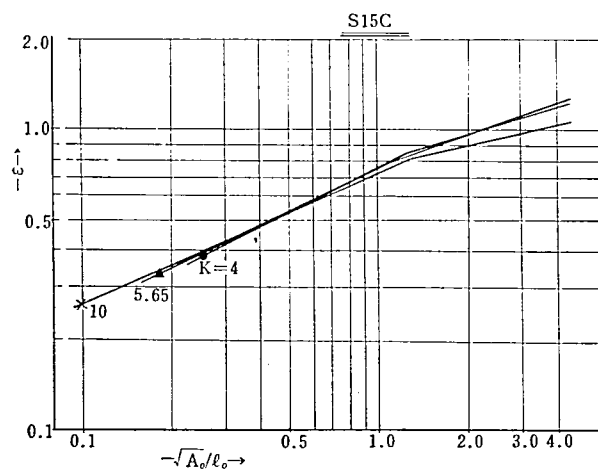


図 7 (a)

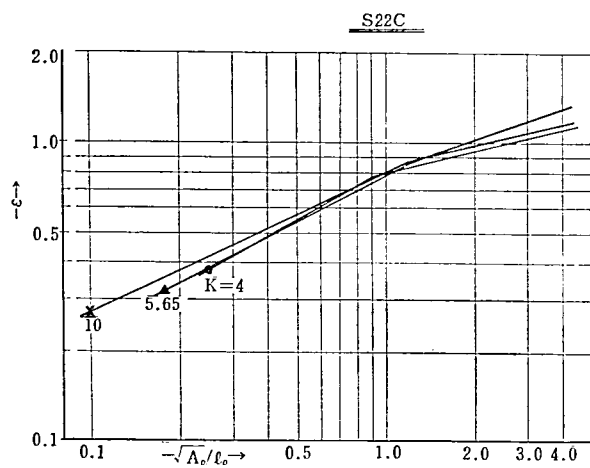


図 7 (b)

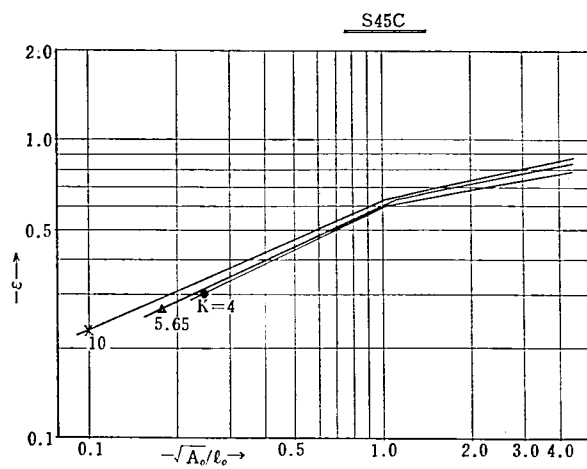


図 7 (c)

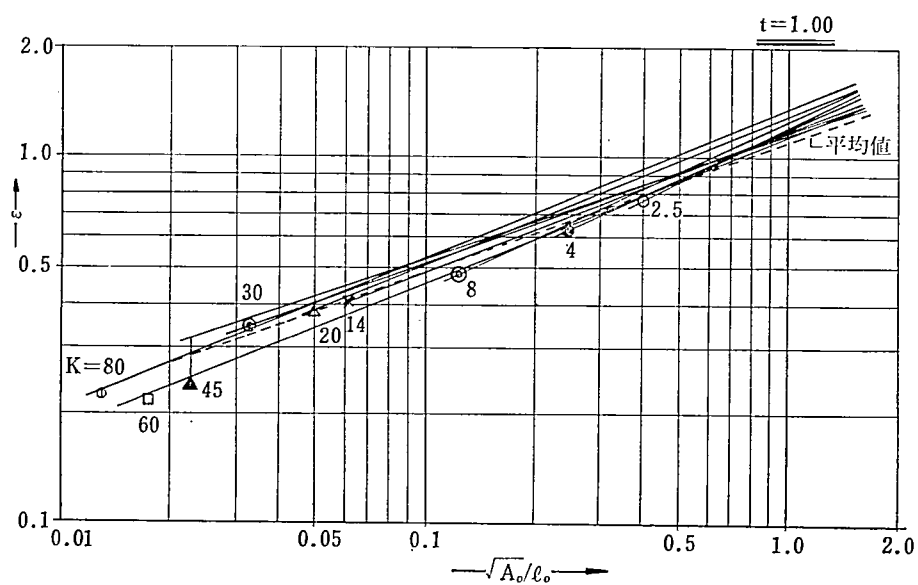


图 8(a)

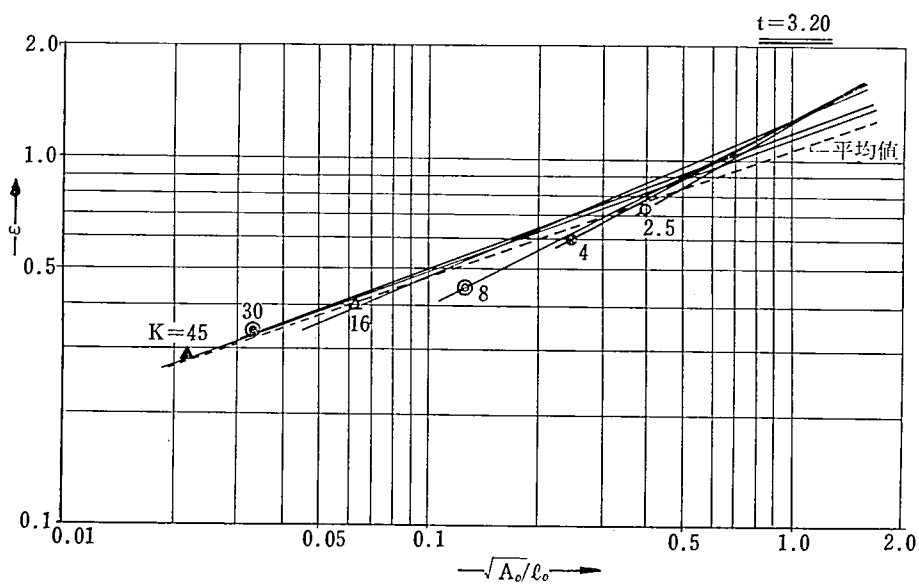


图 8(b)

表 6

材 質	K	m	n	折 れ 点 の $\sqrt{A_0/l_0}$ の 値
S 15 C	4.	0.750	0.480	1.40
	5.65	0.760	0.460	1.15
	10.	0.730	0.450	1.22
平 均	—	0.747	0.463	1.26
S 22 C	4.	0.810	0.570	0.92
	5.65	0.740	0.500	1.15
	10.	0.750	0.460	1.20
平 均	—	0.767	0.510	1.09
S 45 C	4.	0.580	0.510	1.05
	5.65	0.580	0.490	1.10
	10.	0.600	0.440	1.03
平 均	—	0.587	0.480	1.05

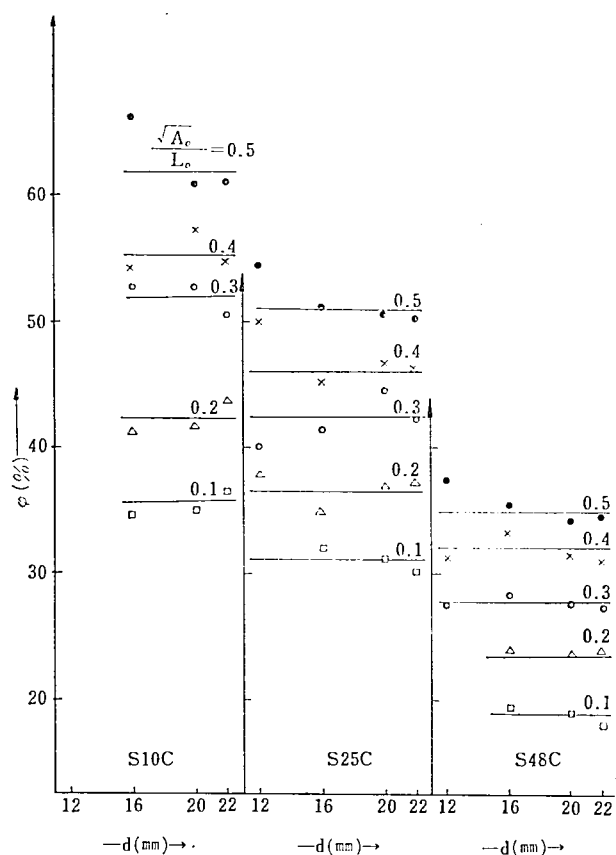


図 9

8. 結 言

丸棒についてはオリバーひずみ分布が局部収縮部まで適用されず図7に示すように折れ線で表現しなくてはならない。その原因を解析するために次のような考え方をしてみる。

$\varepsilon - \sqrt{A_0}/l_0$ 線図において

$\sqrt{A_0}/l_0 < 1.0$ の範囲での直線の傾き n と折れ点より右側（局部収縮）での傾き n' との差 $N = n - n'$ をその材料の脆性を表わす量として考え、実験結果について計算して見ると表7になる。

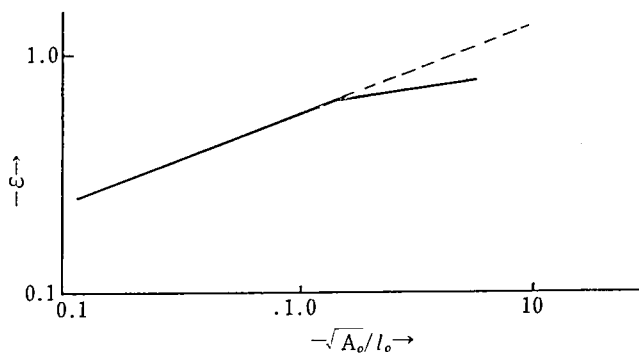
これから言えることは炭素鋼の炭素含有量が増加するにしたがって $n - n'$ の量が増加し脆性量の増加と一致しこの考え方には妥当性があるものと考えられる。

破壊の様式によってひずみの分布が異なるので、それに合致する分布式を求める必要がある。

平板については板厚の影響があり、平面ひずみと平面応力に分けて考えて見たいと思う。

表 7

材 質	n	n'	$n - n'$
S 15 C	0.463	0.300	0.163
S 22 C	0.510	0.274	0.236
S 45 C	0.480	0.199	0.281



n : $\sqrt{A_0}/l_0 < 1$ の範囲での直線の傾き

n' : 折れ点より右側での直線の傾き

図 10

参考文献

- 1) 山本, 高橋: 未発表
- 2) 吉田他: 日本機械学会誌, 67—542 (1964—3) 446.
- 3) 佐藤: 軽金属, 24—11 (1974) 508.
- 4) Kula, E.B. et al.: Bulletin ASTM (1959).
- 5) 山本, 塩崎, 奥田: 日本機械学会関西支部講演論文集 (1977—3).
- 6) 大野: 山口大学工学研究報告, 13—1 (1963) 119, 14—1 (1964) 55.
- 7) 大谷: 製鉄研究, No 257 (1966) 74.
- 8) Fenner, A.J. et al.: NEL Report, No. 87.
- 9) 堀川: 日本鋼構造協会誌, 5—48 (1969) 52.
- 10) 吉田他: 日本機械学会誌, 68—559 (1965) 1082.