純アルミニウム円筒の縦および円周方向の 機械的性質の差*

一之瀬和夫**・増田 泰二**

Difference of mechanical properties of pure aluminum tubes
in axial and circumferential directions*

UDC : 669. 71 : 62-465 : 539. 4

Kanoh ICHINOSE** and Taiji MASUDA**

Effects of four factors on five mechanical properties of aluminum tubes were statistically investigated using the design of experiments (L_{27} containing dummy level). The four factors were direction of uniaxial tension A_1 (longitudinal one A_z , and circumferential one under internal pressure A_θ), length of reduced section (at three levels) of cylindrical specimen k_l , inner diameter as received D_i , and ratio of mean radius of specimen to thickness S_l . The mechanical properties were proof stress σ_s , tensile strength σ_B , F and n values (approximated on the stress-strain curve by the expression $\sigma = Fe^n$), and stress ratio σ_B/σ_B (σ_B being reduced from the F and n values). K_l is only a factor having no effect on the mechanical properties mentioned above. σ_B is independent of the position of wire strain gauge, and is the most reliable when assessing various factorial effects. The stress ratio σ_B/σ_B is significantly affected (significant at 5%) only by interaction of $A_1 \times S_l$. The aluminum tube has the statistical average proof stress and tensile strength 5 to 7% higher in circumferential direction than in longitudinal one.

(Received July 9, 1981)

1. 緒 言

近年、管状素材をさらに成形して機械部品に供する場
合が増加しつつあり^{1)~3)}、管材の機械的性質に関する諸
データの集積が望まれている。板材に比較して管材の場
合には、その成形加工例が多いにもかかわらず、基礎的な
データならびに、成形性あるいは成形限を評価する指標
が十分に整理されてはいない状況と考えられる⁴⁾。管状
素材の異方性を検出するためには一軸引張試験として管
材の縦方向と、内圧負荷での張り出し成形により、円周
方向の引張試験を実施し、両方向での応力-ひずみ関係
を求める必要がある。管材に関する研究としては、各種
管材の縦方向引張試験を行い、加工硬化曲線を得たもの
として矢沢⁵⁾の研究、内圧負荷により発生する軸方向引
張力を軸圧縮力で相殺して張り出し変形を行い、円周
方向の応力-ひずみ関係を求めた Osgood⁶⁾、ならびに
Woo, Hawkes⁷⁾の研究、内圧負荷試験にあたつての測定

値整理法と精度との関連を詳細に扱ったものとして斎藤
ら⁸⁾の研究、総説として宮川^{9),10)}の報告をあげることが
できる。

本報告では、方向性に重点をおき、管状素材として市
販純アルミニウム管をとりあげ、比例限度力、引張強
さ、応力-ひずみ曲線に n 乗硬化則を適用したときの
 F , n 値等の機械的性質に及ぼす、一軸引張の方向 (管
の縦および円周方向)、管の公称外径 (内径)、肉厚に対す
る平均半径の比、および、平行部長さの影響につき、実
験計画法によるわりつけに従って実験を行い¹¹⁾、デー
タを統計的に処理した結果を示す。つぎに、実験計画法
を利用した理由について述べる。従来のように実験諸条件
のうち、ある要因の水準を固定して残りの要因の水準を
順次変えて実験を行う方法では多数回の実験を行わなけ
ればならない。この場合、実験全体を通じての誤差 (偶
然および測定誤差) を検出することも、各要因の水準を
変えた影響はどれくらいであるかを判定することもでき

* 軽金属学会第60回春期大会 (福岡) にて発表 (No. 80)。

** 工学院大学 (東京都)。Kohgakuin University (Tokyo)。

ない。実験計画法に従えば、各要因の分散を全体の誤差分散で検定することにより、主効果と交互作用に分離して、データの全変動に対する各要因の貢献度を推定することができる。ただし、要因数と水準ならびに直交表の大きさによって、とり出せる交互作用数に制限がつけられる。実験計画法ならびに、統計的手法を利用した報告として、薄板の引張試験^{12),13)}、あるいは機械部品締結部の解析¹⁴⁾をあげることができる。

記号

D_{oo} : 納入状態での円筒外径 (mm)

D_o : 平行部外径 (mm)

D_m : 平行部平均直径 (mm)

R_m : 平行部平均半径 (mm)

t_o : 平行部肉厚 (mm)

A_i : 一軸引張の方向, $i=\theta, z$ とし 2 水準

D_i : 円筒内径 (mm)

K_i : 平行部長さ (mm)

S_i : 平行部の肉厚 t_o に対する
平均半径 R_m の比 (R_m/t_o)

p : 内圧

W_p : 内圧により、円筒の縦方向に発生する引張力

W_a : W_p を相殺するための縦方向圧縮力

A_c : 円筒の実質断面積 [$\pi (D_o^2 - D_i^2)/4$]

σ_z' : 円筒の縦方向応力

σ_θ : 円筒の円周方向応力

σ_t : 円筒肉厚中心部での半径方向応力

σ_s : 比例限度力

σ_B : 引張強さ

σ : 真応力

ε : 真ひずみ

F, n : $\sigma = F\varepsilon^n$ で近似したときの塑性係数 (F) と硬化指数 (n), ε の範囲は $0.003 \leq \varepsilon$

σ_B : F および n 値から理論的に求まる引張強さ

2. 実験方法

2.1 材料および前加工

供試材としての純アルミニウム管は JIS A1050TD-H16 (純度99.5%以上) でB社製のものを納入外径3種類について熱処理せずに用いた。これらの各断面における顕微鏡組織写真を **Photo 1** に示す。寸法は、 $D_{oo}/D_i = 20/16, 28/25, 40/34$ で、それぞれの肉厚 H_v は62.5, 58.0, 53.6であった。加工履歴は不明であるが、この写真によれば、管材の引抜きによる集合組織の存在が明らかであり、公称直径の小さいほど、結晶粒は小となり、比例限度力の大きくなることが推察される。**Fig. 1** に円筒試片の形状を示す。円筒試片は、両端内径部を旋盤の両センチで支持後、外径の平行部 K_i を旋削加工し、各

Transverse section

Longitudinal section

Photo 1 Microstructures of aluminum tubes. (JIS A1050 TD-H16, as received).

K_i : Length of reduced section, t_o : Thickness
 L : Length of grip portion (40mm), R_m : Mean radius
 D_i : Inner dia. (as received), D_m : Mean dia.
 D_{oo} : Outer dia. (as received)

Fig. 1 Dimensions of cylindrical specimen.

円筒試片について、平均肉厚からの偏りを±2%以内におさめた*。円筒内面は引抜き加工による表面そのままとし、円筒内の残留応力も考慮しないことにした。以後、管材から切断した試片を円筒と称して進める。

2.2 要因と直交表へのわりつけ

L_{27} の直交表において、**Table 1** に示すように、第1列の実験番号19~27の第3水準を第1水準に変更し、第1列には一軸引張の方向 A_i をわりつけた。すなわち、第1水準として内圧による円周方向の一軸引張 A_θ を、第2水準として縦方向の一軸引張 A_z をわりつけた。第

* この際、旋削加工による加工変質層の生成をできるだけ避けるように注意した。この加工表面を2000番のエメリ紙で研磨した後の肉厚は母材肉厚と同じことが確かめられた。

Table 1 Design of experiment (L_{27} containing dummy level).

Factors	$A_t \ S_t$		$A_t \times S_t$		$A_t \times K_t$		$S_t \times K_t$		$D_t \times K_t$	
Column No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11
Experimental No.										
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1
19	1	1	3	2	1	3	2	1	3	1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
26	1	3	2	1	2	1	3	1	3	3
27	1	3	2	1	3	2	1	2	1	1

Factors	Levels	Details of levels
A_t : direction of tension	2	A_θ (first level), A_z (second level)
S_t : ratio of mean radius (R_m) to thickness (t_0)	3	$S_1=9.0, S_2=13.5,$ $S_3=20.0$
K_t : length of reduced section (mm)	3	$K_1=2D_m, K_2=3D_m,$ $K_3=4D_m$
D_t : inner dia. (mm)	3	$D_1=16, D_2=25,$ $D_3=34$

Interactions of $A_t \times S_t$, $A_t \times K_t$, and $S_t \times K_t$ are also taken into account.

2, 5, 9 列にはそれぞれ S_t, K_t, D_t をわりつけ、2 要因交互作用として第 3, 4 列に $A_t \times S_t$ を、第 6, 7 列には $A_t \times K_t$ を、第 8 および 11 列には $S_t \times K_t$ をわりつけた。残りの第 10, 12, 13 列が誤差列にあてられている。 S_t は円筒の肉厚 t_0 に対する平均半径 R_m の比である。円筒の平行部長さ K_t については、 $K_t > 2D_m$ であれば、内圧負荷試験における破裂圧力はほぼ一定値となることが実験により確認されている^{15), 16)} ことから、 K_t を (2~4) D_m の範囲にとつた。円筒直径の代表値としては納入円筒の内径 D_t を用いた。また、要因 D_t と他要因との交互作用、たとえば、 $D_t \times A_t$ など、および、3 要因交互

Fig. 2 Apparatus for uniaxial tension test.

作用 $A_t \times S_t \times K_t$ など は今回割愛せざるを得なかつた。各実験番号中での繰返し回数は 3 回であり、実験順序はランダムに行い、データはこれら 3 回の平均値を用いて整理した。

- 2.2.1 縦方向の一軸引張試験
- 容量 49 kN の万能試験機を用い、Fig. 2(a) に示す引張治具に円筒試片②を固定した。円筒の平行部中央位置縦方向に沿って塑性域用ひずみゲージ①が取付けてある。試験速度は準静的であり、公称ひずみの増加率を $(25 \sim 30) \times 10^{-5}/\text{min}$ の範囲とした。これをクロスヘッド速度に換算すると 0.01~0.04 mm/min となる。
- 2.2.2 円周方向の一軸引張試験
- 万能試験機の圧縮盤間に、Fig. 2(b) の上、下型で設定された内圧負荷用円筒試片を置き、容量 270MPa の手動油圧ポンプで圧力油を供給する。円筒の中央部には円周方向に沿ってひずみゲージ①が取付けてある。②は

Fig. 3 Force system of specimen under internal pressure.

内圧用円筒試片，⑤は試片の張出しを両端で拘束するためのダイであり，4つ割りにしてある。⑥の本体に④の3つ割りチャックを置き，⑦のナットで固定する。円筒試片の内側には⑧の心金を入れ，油漏れ防止用のリング⑨を配置し，圧力計の出力を記録計へ導く。いつばう，内圧 P により，円筒試片の縦方向には引張力が作用し，これを相殺するために試験機により圧縮力を加えつつ実験を進めた。Fig. 3 において，内圧負荷前の円筒試片内径を D_i とすると，円筒の縦方向には，

$$W_p = \pi D_i^2 p / 4 \quad (1)$$

なる引張力が作用する。この W_p を相殺するために W_a なる圧縮力を加えて，式(2)で示される円筒内の縦方向応力 σ_z' をできるだけ少なくした。

$$\sigma_z' = (W_p - W_a) / A_c \quad (2)$$

W_p と W_a は圧力計出力と圧縮用ロードセルの出力を記録計に導き，両者のトレースを一致させるように制御した。また， p により円周方向引張応力 σ_θ が発生し，円筒の内圧負荷前の平均半径を R_m ，肉厚を t_0 とすれば，薄肉円筒の式から σ_θ は次式となる。

$$\sigma_\theta = p R_m / t_0 \quad (3)$$

つぎに，肉厚中心部での半径方向応力を σ_r として，

$$\sigma_r = -p / 2 \quad (4)$$

なる平均の圧縮応力が常に作用していると考え。実験中 σ_z' については常に， $0.03 \geq |\sigma_z' / \sigma_\theta|$ となるようにした。また，本実験では最小の S_1 と最大の S_3 の範囲について式(4)を用いれば， $-0.06 < \sigma_r / \sigma_\theta < -0.03$ であることが計算から求まる。

3. 実験結果および考察

3.1 機械的性質（特性値）の整理法

Fig. 4 に一例として，真応力 (σ) と真ひずみ (ϵ) の関

Factor A _i	Circumferential direction (A _θ)			Longitudinal direction (A _z)		
Experimental No.	6	4	5	14	15	13
Factor D _i (mm)	D ₁ =16	D ₂ =25	D ₃ =34	D ₁ =16	D ₂ =25	D ₃ =34
Factor S ₁ , K _i	S ₂ , K ₃	S ₂ , K ₁	S ₂ , K ₂	S ₂ , K ₂	S ₂ , K ₃	S ₂ , K ₁
mark	○	●	⊖	○	●	⊖

Fig. 4 Example of stress (σ)-strain (ϵ) relationships.

係を縦方向と円周方向について示してある。比例限度 σ_s は公称ひずみ 0.2% 点での公称応力の値，引張強さ σ_B としては円周方向については，内圧による破裂圧力の最大値から求める値である。 F および n 値については，アルミニウム板材で報告されている結果¹⁷⁾を参考にして，すべてのデータにつき， $0.003 \leq \epsilon$ の範囲で最小自乗法を適用して求めた。ひずみの範囲により，これらの値は変動するが，本報告では一貫して上記の ϵ の範囲とした。また，求められた F および n 値から理論的に求める引張強さを σ_B とすれば， e を自然対数の底として，

$$\sigma_B = F(n)^n \quad (5)$$

であり¹⁸⁾，実験から直接求められた σ_B との比 (σ_B / σ_B) を考えることによって， F および n 値の精度に及ぼす各要因の効果を検討できる¹⁹⁾。

3.2 破断様式の概要

Photo 2 に縦および円周方向の一軸引張による破断例を示す。縦方向引張時の破断は縦方向に対しほぼ 60° 方向にくびれが進行して，いわゆるスパイラル破断⁴⁾となつて分離する。いつばう，内圧による円周方向の一軸引張では，いずれの場合でも縦方向に沿つて破断する。破断位置は円筒の長さ K_i の大きさによつて異なり，円筒の中央位置 (C-C) からの距離 δ で表示すると， K_1 では $0 \leq \delta / D_m \leq 0.3$ の範囲であつて，中央部破断が多いが， K_2 ではこれが $0.2 \sim 1.0$ ， K_3 では $0.7 \sim 1.4$ である。円筒が長くなると，中央位置から離れた位置で破断することから，今後，硬化材の場合には，ひずみゲージ取付位置が最大バルジ位置に一致するように K_i を選ぶ必要がある。

3.3 機械的性質に関する分散分析と考察

Table 2 は分散分析の結果であり， σ_s を例にとり，平方和および分散の値を示す。すべての特性値に対して有意でない要因は円筒の長さ K_i である（本実験の $K_i = 2D_m \sim 4D_m$ について）。以下，1% および 5% 有意であ

Table 2 Analysis of variance on mechanical properties.

		proof stress σ_s			tensile strength σ_B	F value	n value	stress ratio σ_B/σ_B
factors	degrees of freedom	sum of squares	mean square	mean square ratio F_o	F_o	F_o	F_o	F_o
A_i	1	3.241	3.241	38.81**	24.26**	12.36**	0.28	1.20
S_i	2	0.498	0.249	2.98	0.05	7.09*	11.61**	2.19
$A_i \times S_i$	2	3.938	1.969	23.58**	15.42**	14.84**	12.05**	6.05*
K_i	2	0.107	0.054	0.64	0.56	1.68	1.56	0.49
$A_i \times K_i$	2	3.552	1.776	21.26**	12.97**	9.45**	2.07	3.76
$S_i \times K_i$	4	3.047	0.762	9.12**	0.64	1.53	3.23	0.30
D_i	2	8.781	4.391	52.57**	217.60**	139.50**	32.93**	2.04
error (E)	11	0.919	0.084					

** : significant at 1%, * : significant at 5%.

σ_B being reduced from F and n values.

Photo 2 Tested specimens showing effects of factors and levels on location of fracture or necking.

つたものの例について各要因効果の推定グラフを示す。

3.3.1 σ_s および σ_B に及ぼす諸要因について

Fig. 5(a)~(d) は σ_s , σ_B に及ぼす各要因の主効果と交互作用効果の推定である。図中 I 印は95%信頼区間であり、今回の実験では縦方向は円周方向に比べて実験の本数が半分であるから、それぞれの信頼区間幅は異なる。また、たとえば、Fig. 5(a), (b) について σ_s に関する水準 A_0 の効果値 114.5 MPa は、 S_1 , S_2 , S_3 で行われた値 (117.2, 113.6, 112.9 MPa) の平均値を示すもので

ある。要因 A_i : 両者に影響を及ぼし、それぞれ σ_s , σ_B について、円周方向が縦方向より 5 ~ 7 % 程度強く、納入アルミニウム円筒で行われた σ_B についての結果¹⁶⁾とも矛盾していない。ただし、円周方向の応力計算には肉厚中央部分の半径を用いた [式(3)参照]。要因 $A_i \times S_i$: 縦方向について、薄い (S_i が大) 方が強い (σ_B が大) 理由は、かたさ試験 (項 2.1) では認められなかつた旋削表面の加工硬化層が、円筒軸に垂直な断面で占める割合が大きく影響したものと考えられる。これに対し、円周方向で弱い理由は、旋削加工による肉厚の偏りと内面の縦方向傷* が旋削による加工硬化層よりも大きく影響したものと考えられる。 $A_i \times K_i$: 両者に対し有意。 $S_i \times K_i$: σ_s に対してのみ有意。 D_i : σ_s および σ_B の両者に対し有意で、かつ、かたさの値とも矛盾していない (Photo 1 参照)。

3.3.2 F , n 値および (σ_B/σ_B) に及ぼす諸要因について

F および n 値は実験値の応力 (σ) ~ ひずみ (ϵ) 関係から最小自乗法により、それぞれの実験の組合わせについて求められた値であり、(σ_B/σ_B) も式 (5) を用いて 1 組の、 F , n 値から推定される引張強さ σ_B と、実験値の σ_B との比であることから、これら三者を関連させて検討する。効果の推定グラフを一例として **Fig. 6(a)~(d)** に示す。要因 A_i : F 値に対してのみ有意であり、縦および円周方向の n 値の違いは実験誤差の範囲内であることがわかる。要因 S_i : F , n 値に対し有意であり、このことは、円筒が薄くなるほどゲージ取付位置以外で破断しやすく、その結果、ゲージ取付位置での伸びが小となり、最小自乗法でえられた F , n 値が大きくなったためと考

* 破裂した所での縦方向傷の深さは $D_1=16$ mm では最小肉厚の 5%, $D_2=25$ mm では 3 % であつた。

Fig. 5 Main and interaction effects of factors (A_i , $A_i \times S_i$, $A_i \times K_i$, and D_i) on σ_s and σ_B .

Fig. 6 Main and interaction effects of (A_i , S_i , $A_i \times S_i$, and D_i) on F and n values.

えられる。 $A_i \times S_i: F$ および n 値に対し有意, (σ_B/σ_s) に対しても 5% 有意であり, このことは, 今回の実験の精度を反映していると考えてよい。すなわち, 円筒が薄くなるに伴い σ_B が大きめに見積られ, 円周方向の σ_B は小さく, 縦方向の σ_B は大となっている [Fig. 5(b)] から, 結局, 肉厚の薄くなるに従って (σ_B/σ_s) の値に差がでてくるからである。Table 2 において, $A_i \times S_i$ の分散比は 6.05* で寄与率 24%, $A_i \times S_i$ 以外のすべての要因を誤差 (E) にプールしても分散比 4.78* で寄与率 22% であった。 $A_i \times K_i: F$ 値に対して有意。 $D_i: F$ および n 値に対して有意である。今回は, さらに進んで, 処理間平方和の分解を行い, 各水準間の違いを検討するまでに至らなかった。

4. 結 言

市販純アルミニウム管を納入状態のまま, 方向性に重

点をおき各要因を直交表にわりつけて, 縦および円周方向の一軸引張試験を行い, 本実験の範囲では次のことがわかった。ただし, 円周方向の応力計算には肉厚中央部の半径を用いた。

1) 要因 A_i は σ_s , σ_B および F 値に対し, 要因 S_i は F および n 値に対し, 要因 D_i は σ_s , σ_B , F , および n 値に対しそれぞれ有意である。また, 交互作用 $A_i \times S_i$ は σ_s , σ_B , F , n 値, および (σ_B/σ_s) に対し, $A_i \times K_i$ は σ_s , σ_B , および F 値に対し, $S_i \times K_i$ は σ_s に対して有意である。要因 K_i のみはいずれに対しても有意でない。

2) 本実験で主眼とした σ_s と σ_B の方向による差異は円周方向が縦方向より 5~7% 大きいことがわかった。

3) σ_B はゲージの取付位置によって影響を受けない特性値であるから要因効果の推定にあたり最も信頼できる。

4) (σ_B/σ_R) に影響を及ぼす要因 $A_i \times S_i$ は, F および n 値を求める際の曲線当てはめの精度を左右する 交互作用であると考えられる。

終りに, 実験に協力した当時学生の筒井清久, 新田教雄, 萩谷和則の 3 氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 遠藤, 西村, 真鍋: 塑性と加工, **19** (1978), 742.
- 2) 西村, 遠藤, 真鍋: 塑性と加工, **19** (1978), 918.
- 3) チューブフォーミング分科会: 塑性と加工, **21** (1980), 521.
- 4) 第75回 塑性加工 シンポジウム (チューブフォーミング—その現状と問題点): 日本塑性加工学会, 1981年 5月22日.
- 5) 矢沢: 伸管ダイスの研究, 機械試験所報告, **48** (1962).
- 6) W. R. Osgood: *J. Appl. Mech.*, **14** (1947),

A-147.

- 7) D. M. Woo, P. J. Hawkes: *J. Inst. Metals*, **96** (1968), 357.
- 8) 斎藤, 井垣: 機械学会 論文集, **32** (1966), 1037.
- 9) 宮川: 軽金属, **25** (1975), 475.
- 10) 宮川: 金属材料, **9** (1969), 11.
- 11) たとえば, 鷺尾泰俊: 実験計画法入門, 日本規格協会 (1979), および, 田口玄一: 実験計画法 (上, 下), 丸善 (1976).
- 12) 吉田: 塑性と加工, **6** (1965-11), 628-649.
- 13) 吉田: 塑性と加工, **6** (1965-11), 650-663.
- 14) たとえば, 吉本, 丸山, 長谷川: 精密機械, **44** (1978), 66.
- 15) 淵沢, 竹山: 精密機械, **45** (1979), 106.
- 16) 朴, 宮川: 機械学会論文集, **32** (1966), 447.
- 17) 宮川, 朴, 西村: 塑性と加工, **4** (1963), 483.
- 18) たとえば, 益田, 室田: (改訂) 工業塑性力学, 養賢堂.
- 19) 吉沢, 高橋: 塑性と加工, **6** (1965), 688.