

ジュメット線の熱膨脹

岸 井 貫*

Thermal Expansion of Dumet Wires

By T. KISHII

Mechanical Material Engineering Dept. (in Field of Lamp and Tube), Tokyo Shibaura Electric Co.

Dumet wires are used for forming tight vacuum seal in the stem glass of lamps and electron tubes. The relations between the expansions of Dumet wires and glass has a vital effect on the perfection of seal. The expansion of Dumet wires with diameters of 0.5 to 1.5 mm has been measured for both in the axial and radial directions by the interferometric method.

The results were compared with the theories suggested by Dr. Takagi and Mizuike, and slight differences were observed.

These differences, however, have been reasoned that there may exist stresses due to working in the interior of Dumet wires or hardening and plastic deformation in the copper shell. It is also pointed out that the plastic flow of copper and its time dependency are supposed to affect on the rate of stress release in Dumet-to-glass seals.

(I) 緒 言

ジュメット線は周知のとおり、電球、螢光燈、受信管、ブラウン管その他、各種の管球の封入線として使用される金属線である。ジュメット線はこれら管球のステムガラスと良く接着して、気密封じを形成する役割を持っている。ジュメット線がガラスと良好な気密封じを作るためには、ジュメット線の熱膨脹とガラスのそれとの関係が適当であって、ガラスの軟化する温度範囲で封着が行われてから常温まで冷却する途中および冷却後において、ガラス中に生ずる機械的歪力が十分小さく、ガラスが破損せず、さらに熱的機械的衝撃に対しても丈夫なことが必要である。したがってジュメット線の熱膨脹、あるいは膨脹係数は封じの良否と密接な関係があると考えられる。

ジュメット線は、心金と称する鉄・ニッケル合金（ほぼ鉄 58%、ニッケル 42%）の丸棒を、真鍮ろう箔とともに銅管中に挿入して、全体を加熱し心金と銅管をろう付した後細く線引して製造される。ジュメット線はこのような構造を持つために、その半径方向と軸方向とは熱膨脹の有様が非常に異なるのである。

ジュメット線の熱膨脹に関しては、高木氏⁽¹⁾、水池氏⁽²⁾によって理論が提出されており、直径 4 mm 以上のジュメット線については理論と実測が一致することが確かめられた⁽²⁾。しかし直径が 1.5 mm 以下の実用されるジュメット線の、特に半径方向の熱膨脹を測定することは、試料の直径が細くて困難と考えられている。したがって

実測値としては、Hull and Burger⁽³⁾が直径約 1.3mm のジュメット線に対して与えた値および、池田氏および上関氏⁽⁴⁾が直径 0.4mm のジュメット線について測定した結果があるだけで不十分の感をまぬがれない。

理論的には、ジュメット線の熱膨脹はその銅比（銅の重量/ジュメット線の全重量）が同一ならば、直径に無関係に定まることが予期されるけれども、実際のジュメット線においては、加工歪、銅—真鍮ろう—心金間に生ずる相互拡散等の影響を受け、その加工度、直径によっても変る可能性があるため、実用ジュメット線について熱膨脹を測定することが望まれる。

この目的のために筆者が行った実験を報告して、大方の御批判を仰ぎたいと思う。

(II) 熱膨脹の測定法

2.1 測定上の注意

ジュメット線の熱膨脹の測定に対しては、誤差の原因になるべきことが多数ある。筆者が気付いたことを列挙すると次のとおりである。

(a) 加熱に伴ない、銅表面に酸化膜が生ずるために、半径方向の熱膨脹が 300°C 以上の温度で見掛上著しく大きくなる。

(b) ジュメット線は複合金属であるから、内部の構造や機械歪の分布の僅かな非対称によっても、加熱に際してバイメタルと同様の理由でわん曲し、見掛上半径方向の膨脹は過大に軸方向のそれは過小に測定される。

(c) 試料断面が円形であるから、半径方向の熱膨脹測定に際して保持方法が不良の場合に、ころがって誤差

* 機材技術部

の原因となる。

(d) 銅は塑性変形を起しやすいので、試料に大きい測定圧力を加えてはならない。

(e) 試料は等方体でないから、任意の形に成形する訳にゆかない。加工は実験上不可欠でかつ測定結果に影響しないようなものに限られる。

以上の誤差原因を出来るだけ避けた測定法として筆者が採用した方法は、次に説明するようものである。

2.2 半径方向の熱膨張の測定法

半径方向の膨張測定には干渉膨脹計を用いた。試料を二枚の光学平面の間にはさみ、二面を平行に近くおき、この平面相互の間に等厚の干渉縞(ニュートン環と同一原理によって生ずる。)を生じさせる。試料の膨張は二平面間の距離を変化させ、縞の位置が移動するので、この移動量から試料の熱膨張を求めることができる。

ジュメット線についての測定の困難を避けるために、特別な形の干渉板を用いたので、作り方を図1に示す。

厚さ約 2mm に磨いたテレックスガラス板を用いて、上方干渉板、下方干渉板および支え板を作る。それぞれ a で示した部分をすりへらして、試料と接触すべき b 部を形成する。この b 部の幅はいずれも 0.4mm 位にする。

次に下方干渉板に支え板を溶着し、また突起 c, c' を肉盛りする。この加工後、下方干渉板をあらかじめ 500°C に保った炉中に入れ、そのまま室温まで冷却してなます。

上方干渉板の b 部に近く、端から約 2mm の位置に干

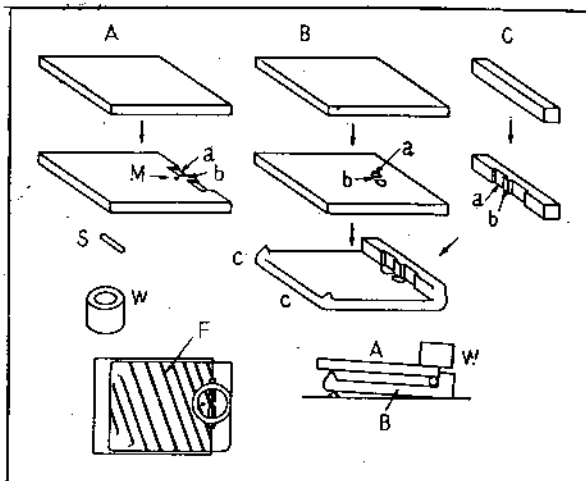


図1 干渉部の構成

Mounting of interference parts for measurement of radial expansion of dumet wire

- A: Upper interferometer plate a: Abraded part
- B: Lower interferometer plate b: Edge to contact with sample
- C: Stopper
- S: Sample c, c': Projection
- W: Weight
- M: Mark point F: Interference fringe

The lowest left: View observed through interferometer
right: Side view

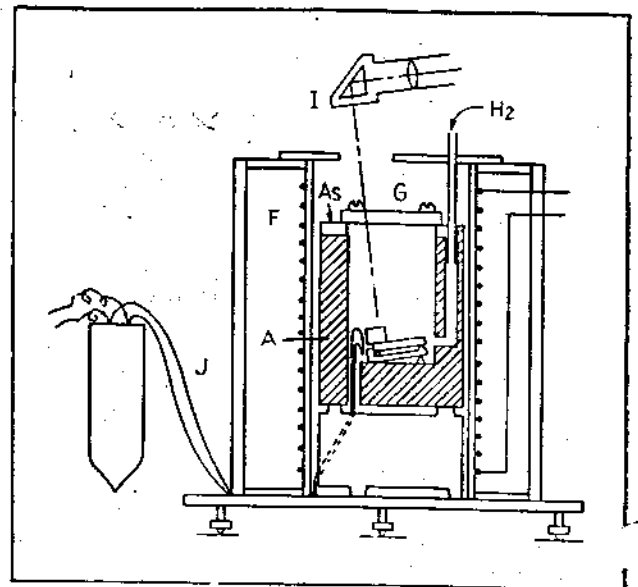


図2 電気炉

Construction of furnace

- I: Interferometer F: Electric furnace
- J: Thermocouple A: Aluminium cup
- As: Asbestos packing G: Glass plate(Terex)

渉縞の移動を観測する場合の目標となるべき点 M を設ける。

試料を大体直径の 8 倍位 (ただし 8mm を超えない。) に切断して、下方干渉板および支え板の b 部でかこまれた隅に横たえる。上方干渉板は、その b 部が下方干渉板の b 部と正しく相対するように置かれ、試料と突起 c, c' とによって支えられる。c および c' を磨りへらして高さを調整すると、上下の干渉面がほぼ平行になって、干渉計で観察した時に等厚の干渉縞が現われる。

干渉計は Merritt⁽⁵⁾ によって記述されたものとほぼ同型のものである。

測定のために干渉板と試料をセットした時の状況は図1最下列のとおりである。下方干渉板は僅か傾けて試料のある部分を低くし、また試料の真上に輪形の重錘を置いて、試料がころがることを防いでいる。(Weighing Technique⁽⁶⁾) 上方干渉板の重量は 5g 弱、重錘重量は約 8g で、試料に加わる力は約 10g になる。

熱膨張の測定に際しては、試料、干渉板および重錘は肉厚のアルミニウム製容器中に入れられ、電気炉で加熱される(図2)。テレックスガラスの磨厚板と石綿板製のパッキングとを用いて容器の上方を密閉し、側壁を経て乾燥した水素ガスを出来るだけ少ない流量で送込む。水素ガスは下方の熱電対挿入孔から滲出して逃れ去る。この方法で干渉部分の温度分布がみだされることなく、試料の酸化を防ぐことができた。加熱速度は 3~3.5°C/min とし、干渉縞の移動量は縞の幅の 1/10 まで目測した。スペクトル線にはスペクトル用水銀ランプの緑線を用いた。

常温 t_1 °C と温度 t_2 °C との間で、目標点 M においては干渉縞が n 個移動したとすれば、M では上下干渉面間の距離 l' の変化は

$$e' = \frac{\delta l'}{l'} = \frac{\lambda_0}{2l'} n + (\Delta_1 - \Delta_2)$$

で表わされる。ただし λ_0 はスペクトル線の真空中における波長 0.5462 μ , Δ は波長の補正であって、温度 t_1 および t_2 の水素ガス中の波長はそれぞれ

$$\lambda_1 = \lambda_0(1 - \Delta_1)$$

$$\lambda_2 = \lambda_0(1 - \Delta_2)$$

と書かれる。 Δ は標準状態の水素ガスの屈折率 n_0 が 1.00014 であり、アルミニウム空気中の水素ガス圧力が 1 気圧を保ち、 $(n-1)$ が絶対温度に逆比例して変化すると仮定のもとに計算される。また l' としては試料ジュメット線の直径 l をそのまま用いて差支えない。

このようにして求められた e' から、試料の熱膨脹 $e = \delta l/l$ を次のように算出する。

下方干渉板の突起 c, c' と、上方干渉板との二接触点

を結ぶ直線を h , 試料の中心線を上方干渉面に射影した直線を i とする。 h と i とは互にはほぼ平行である。M と h および i との距離をそれぞれ x, y とすれば

$$e = e' + (e' - e_0) \frac{y}{x}$$

である。 e_0 はテレックスガラスの熱膨脹で、その膨脹係数が温度範囲にかかわらず $34 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ であるとして計算してよい。

直径 1mm の試料の場合を例として測定誤差を評価してみると、干渉縞の移動量の読取誤差は 0.3 μ/cm の膨脹に相当する外、試料直径の測定誤差に原因するもの 1%, 温度測定の誤差によるもの 1~2% と考えられる。

この方法によって各種の金属線の半径方向の熱膨脹を測定した結果を図 3 に掲げた。真空溶解銅 Cu(V), Ni, W, Mo は管球材料であり、Pt は白金—白金ロジウム熱電対の素線である。測定誤差の範囲内で文献値⁽⁷⁾と一致していると考えられる。

2.3 軸方向の熱膨脹の測定法

ジュメット線の軸方向への熱膨脹は、

石英ガラス製の示差膨脹計を用いた。その長さ変化を指示する部分には光の干渉を利用した(図 4)。 I_1, I_2 は干渉板であって、整調ネジ Ad により固定干渉板 I_1 の向きを調整して、干渉縞を現わすことができる。移動干渉板 I_2 は移動桿 Ms に取付けられ、平行移動を行う。

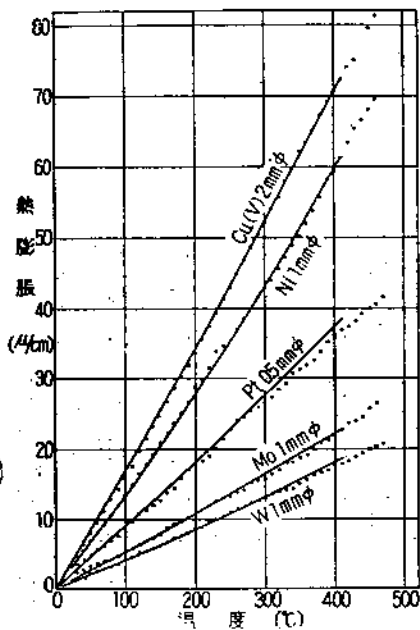


図 3. 各種金属線の半径方向への熱膨脹
Radial expansion of various metal wires—Full lines indicate reference values, namely:

Cu(Vacuum melted)

$$0.041607T + 0.0403T^2$$

$$\text{Ni} \quad 0.041236T + 0.0466T^2$$

$$\text{Pt} \quad 0.048868T + 0.041324T^2$$

$$\text{Mo} \quad 0.04500T + 0.04105T^2$$

$$\text{W} \quad 0.04428T + 0.0458T^2$$

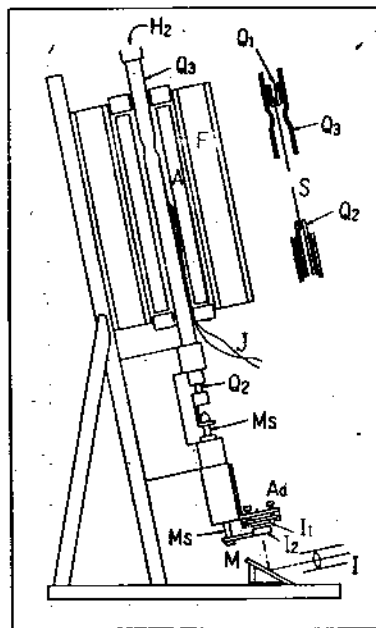


図 4. 軸方向の膨脹測定用示差膨脹計
Differential dilatometer for measurement of axial expansion of metal wire

F: Electric furnace

Q1: fused silica bead

A: Copper tube

Q2: Inner fused silica tube

J: Thermocouple

Q3: Outer fused silica tube

Ms: Movable spindle

I: Interferometer

M: Mirror

I1: Fixed interferometer plate

Ad: Adjusting screw

I2: Movable interferometer plate

S: Sample (with small silver

solder spheres at both ends)

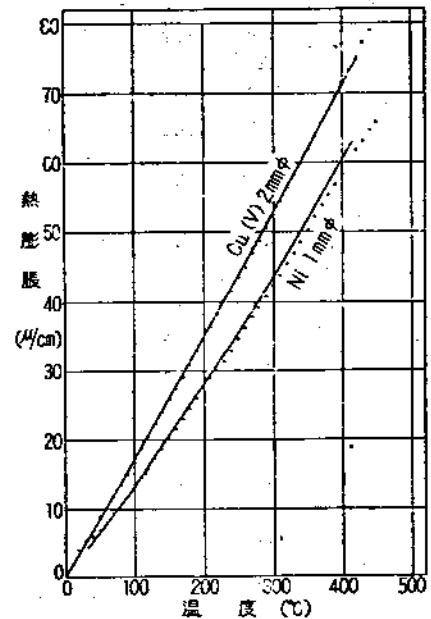


図 5. 金属線の軸方向への熱膨脹

Axial expansion of metal wires—Full lines indicate reference values

試料の長さは10cmとし、その両端は銀ろうを小球状に融着して、試料保持用ビード Q₁ と内方石英ガラス管 Q₂ に引掛け、外方石英ガラス管 Q₃ 中に保持した。試料の熱膨脹は Q₂ に対する Q₂ の相対位置の変化になり、移動棒 M₂ に伝えられさらに干渉縞の移動となって拡大される。膨脹計は図のように、約10°傾いて垂直に近くとりつけられるので、試料には Q₂ と M₂ の重量の合計約30gの張力が加わっている。また摩擦力は少ない。

目標点をよぎった縞の数から、試料と石英ガラスとの熱膨脹の差が求められるので、これに石英ガラスの熱膨脹を加えて試料の熱膨脹が求められる。石英ガラスの膨脹係数は、 $6.3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ とした(干渉膨脹計による実測値)。

電気炉の中には肉厚銅管を入れて、温度分布を平均にした。加熱速度は半径方向の膨脹測定の場合と同じく、 $3 \sim 3.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。

Q₃ 内には乾燥水素ガスを小流量で流して試料の酸化を防いだ。

この方法で、真空溶解銅 Cu(V)、ニッケル線の軸方向の熱膨脹を測定した結果は図5のとおりである。

(III) 測定結果

測定した試料の銅比(銅重量/ジュメットの全重量)を表1に記した。表中“annealed”と記したものは、水素中で550°Cまで加熱後、炉中冷却したものであるが、筆者の入手前にこれと同様な処理を受けたかどうかには関係がない。試料の弾力等から推定すると試料C乃至Hはなまされていたが、試料I乃至Pは加工されたまま、なましを受けていないと考えられた。また“cooling”と記したものはもちろん約480°Cまで加熱されてなまされていることになる。試料Aは心金を単独に1mmφに引いたもので、試料Bは試料Dの銅被を除いて心金だけにしたものである。心金の膨脹はこの二種類を測定しただけであるが、曲線の形に多少の差があるけれども、常温と440°Cとの間の膨脹には差がないので、各ジュメット線の心金をそれぞれ測定することは省略した。測定結果を表1と図6および図7に掲げた。

(IV) 討論

表1. 真空溶解銅、心金及びジュメット線の熱膨脹

Thermal expansion of vacuum-melted copper, core metals and Dumet wires

Sample	Nominal size (mm φ)	Copper ratio (%)	Treatment	Thermal expansion (μ/cm)										
				Temperature (°C)	Direction									
					40	100	150	200	250	300	350	400	440	
Cu(V)	2.0			axial	0.0	9.7	18.8	27.5	36.5	45.6	55.0	64.5	72.3	
				radial	0.0	9.6	18.6	27.4	36.9	45.9	56.2	64.6	71.5	
Core metal	A	1.0			axial	0.0	3.4	6.2	8.8	11.3	14.0	17.2	22.7	28.8
	B				axial	0.0	2.9	5.8	8.1	10.6	13.3	16.8	23.0	29.0
Dumet	C	1.5	22.9		axial	0.0	3.8	6.6	8.9	11.4	14.0	17.6	23.7	29.7
					radial	0.0	4.6	9.0	13.1	17.3	21.7	27.3	34.3	40.7
	D	1.0	23.0		axial	0.0	4.2	7.2	9.7	12.0	14.5	17.8	23.9	30.0
					radial	0.0	4.7	8.7	13.5	17.7	22.2	27.8	35.1	42.0
	E	1.0	23.0	annealed	radial	0.0	4.2	8.4	12.5	16.6	19.6	24.3	31.8	39.3
	F	1.0	23.0	cooling	axial				-22.3	-19.8	-16.7	-13.0	-6.4	0.0
	G	0.72	23.5		axial	0.0	4.0	6.6	8.9	11.2	13.4	17.1	23.3	29.0
					radial	0.0	4.4	8.8	12.3	16.2	20.5	26.7	34.4	41.7
	H	0.72	23.5	annealed	axial	0.0	4.1	7.2	9.6	12.5	15.5	19.0	25.2	31.0
					radial	0.0	4.2	8.7	12.9	16.9	20.6	25.9	33.1	39.5
	I	1.0	30.9		axial	0.0	4.2	7.1	9.5	12.2	14.7	17.3	22.2	27.3
					radial	0.0	4.8	9.5	14.1	18.7	23.6	29.1	36.5	44.5
	J	1.0	30.9		axial	0.0	3.0	6.1	9.1	13.2	16.1	19.2	25.0	29.5
	K	1.0	30.9	annealed	radial	0.0	5.1	9.6	14.3	19.2	23.5	29.4	36.7	44.2
	L	1.0	30.9	cooling	axial				-21.9	-19.0	-16.1	-12.4	-8.0	0.0
	M	0.75	29.6		axial	0.0	3.4	6.1	7.9	9.2	10.5	12.4	16.8	22.5
				radial	0.0	4.0	8.3	13.0	17.2	19.9	24.9	32.6	41.3	
N	0.75	29.6	annealed	axial	0.0	3.4	6.2	8.6	11.3	13.7	17.1	23.0	29.4	
				radial	0.0	5.6	11.5	15.8	20.5	26.0	31.4	38.4	46.0	
O	0.5	29.4		axial	0.0	4.1	7.2	9.9	11.9	13.1	16.2	21.8	27.8	
				radial	0.0	4.8	9.5	13.0	17.1	22.3	28.1	35.0	41.9	
P	0.5	29.4	annealed	radial	0.0	4.9	9.7	14.4	19.2	22.8	27.5	32.8	39.8	

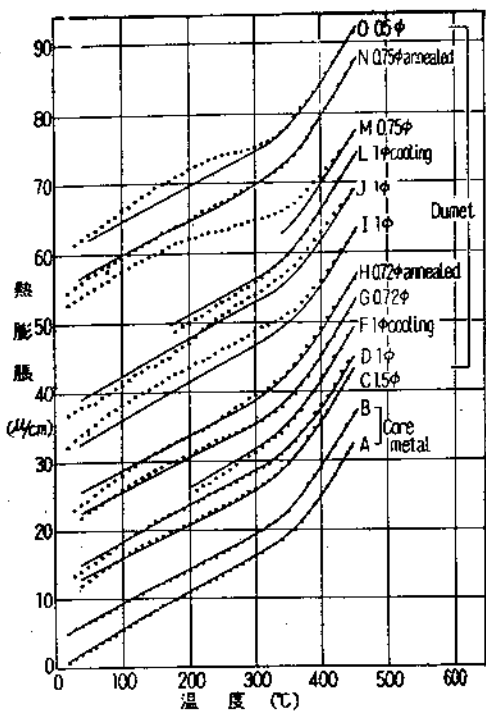


図 6. 心金およびジュメット線の軸方向への熱膨脹
Axial expansion of core metals and Dumet wires—Full lines indicate expansion curves of core metals

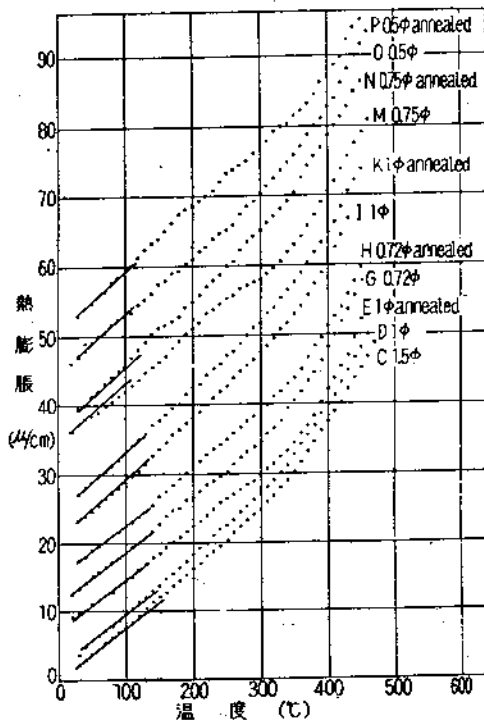


図 7. ジュメット線の半径方向への熱膨脹
Radial expansion of Dumet wires—
Full lines indicate expansion curves following equation (3)

半径方向

$$\frac{\delta l}{l} = \{\alpha_1 + k_r'(\alpha_2 - \alpha_1)\} \tau \dots\dots (5)$$

軸方向

$$e_z = \alpha_1 \tau \dots\dots (6)$$

ここで、 α は膨脹係数、 τ は温度差、 σ はポアソン比、 E はヤング率で、添字 1, 2 はそれぞれ心金、銅についての値であることを示す。 b はジュメット線の半径、 a は心金の半径で、 k_r, k_a, k_r' はジュメット線の銅比及び銅、心金の弾性常数から計算される係数である。弾性常数を表 2 の如く与えた時の k_r, k_a および k_r' の値は永池氏により図 8 の如く

4.1 ジュメット線の膨脹特性

ジュメット線の熱膨脹に関して、高木氏⁽¹⁾、水池氏⁽²⁾によってそれぞれ次の理論式が与えられた。

【高木氏の式】

半径方向

$$\frac{\delta l}{l} = \frac{\tau}{2} \left\{ 3\alpha_2 - \alpha_1 - 3\left(\frac{a}{b}\right)^2 (\alpha_2 - \alpha_1) \right\} + \frac{P_0}{E_1} J_{rad}$$

$$= \{\alpha_1 + k_r'(\alpha_2 - \alpha_1)\} \tau + \frac{P_0}{E_1} J_{rad} \dots\dots (1)$$

軸方向

$$e_z = \alpha_1 \tau + \frac{P_0}{E_1} J_{ax} \dots\dots (2)$$

ただし

$$J_{rad} = \frac{1}{2} \left\{ (1 - 2\sigma_1) \times \left(3 \frac{a^2}{b^2} - 1 \right) J_1 + \left(\frac{a^2}{b^2} (1 - 2\sigma_1) - 1 \right) J_2 \right\}$$

$$J_{ax} = (1 - 2\sigma_1) J_1 + J_2$$

$$J_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sinh^{-1} \sqrt{3} - \sinh^{-1} \sqrt{3} \frac{a^2}{b^2} \right)$$

$$J_2 = \sqrt{\frac{b^2}{a^2} + 3} - 1$$

【水池氏の式】

ジュメット線全体が弾性的に変形する場合

半径方向 $\frac{\delta l}{l} = \{\alpha_1 + k_r(\alpha_2 - \alpha_1)\} \tau \dots\dots (3)$

軸方向 $e_z = \{\alpha_1 + k_a(\alpha_2 - \alpha_1)\} \tau \dots\dots (4)$

銅部分が完全塑性体と見なされる場合

く計算されている。また J_{ax}, J_{rad} は銅比によって定まる常数、 P_0 は銅の弾性限界で、銅中の歪力 P_r, P_θ, P_z の間に

$$(P_r - P_\theta)^2 + (P_r - P_z)^2 + (P_z - P_\theta)^2 > 2 P_0^2 \dots\dots (7)$$

なる関係が生ずると銅は塑性変形を起して、左辺を右辺より小さくしようとするものである。ただし P_r, P_θ, P_z はそれぞれ半径方向、切線方向、軸方向の歪力である。

今、内部歪が全然ないジュメット線があったと仮定しよう。このジュメット線に比較的小さい温度変化を与えると、心金と銅との膨脹差が小さくて、そのため銅中の歪力が

$$(P_r - P_\theta)^2 + (P_r - P_z)^2 + (P_z - P_\theta)^2 < 2 P_0^2$$

なる条件を満たしているから銅は塑性変形を起さず、ジュメット線は式(3)および(4)に従って膨脹する。この部分を図 9 r 及び a の AB で示す。B においては、銅中の一部で式(7)が成立し塑性変形を生じはじめるが BC の部分では塑性変形をする場所が拡大して行き、膨

表 2. 銅、心金および鉛ガラスの密度と弾性常数
Density and modulus of elasticity of copper, core metal and lead glass

	密度 g/cm	ヤング率 E kg/mm ²	ポアソン比 σ
心金	8.15	1.55 × 10 ⁴	0.31
銅	8.9	1.27 × 10 ⁴	0.35
鉛ガラス	3.1	0.60 × 10 ⁴	0.25

脹は(3)式, (4)式から, (5)式, (6)式に従うように移って行く。C点ではほとんどすべての点で塑性変形を生じ, したがって以後銅は完全塑性体とみなされるので, ジュメット線の膨脹は(5)式, (6)式に従い, CD部はAFと平行になる。この時のCD部とAF部との, 縦軸に沿っての距離がそれぞれ $(P_0/E_1)J_{rad}$, $(P_0/E_1)J_{ax}$ であらわされると考えられる。しかし P_0 は高温になるに従って小さくなるので, CD部とAF部は高温になるとともに近づき, $P_0=0$ になれば合致してしまう (F点)。

高温において焼鈍されて内部歪を除かれたジュメット線を冷却して行くと, 最初弾性域GH, ついで塑性-弾性過渡域HIを経て常温Jに達する。高温においては P_0 が小さいため GHIは無視してよい。またIJとAFとの縦軸に沿っての距離は低温ほど大きくなるのである。

Jなる状態にあるジュメット線を再び加熱すれば, 最初銅と心金の膨脹差は内部歪を緩和するように働くので, JKなる弾性域を生じ, ついで塑性への過渡域を経て塑性域LMに入り膨脹すると考えられる。JKなる弾性域は水池氏の計算によれば約70°Cの温度範囲をもつものである。

図6および7に掲げた測定結果が以上の考え方により説明できるかどうかを検討して見よう。

4.2 軸方向の熱膨脹

図6において, 実線は心金の膨脹曲線を記入したもの

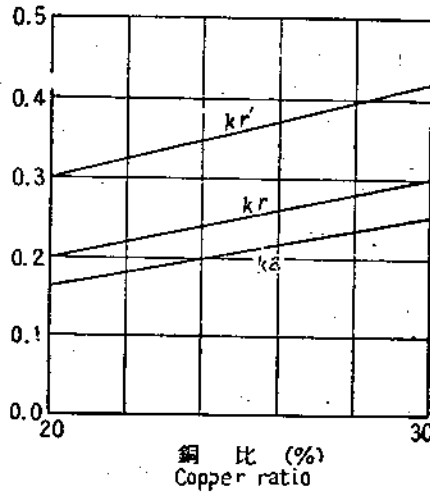


図8. 銅比と k_a, k_r , および k_r' との関係
Relation between copper ratio and coefficients k_a, k_r and k_r' (After Mizuikel)

である。

試料 C, D, G, H, N および試料 F, L の冷却時の測定値はいずれも図 9a2 の曲線 JKLM または IJを示している。また $(P_0/E_1)J_{ax}$ も, $E_1=1.5 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$,

$P_0=7 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ として説明できる。これらはいずれも測定前に焼鈍を受けたと考えられる試料である。

試料 M および O は内部に著しい機械的歪があって, 特別な膨脹曲線を示している。

ジュメット線は伸線に際して軸方向の張力を受けるが, その中で銅中に生じた歪力の一部分は, 銅の塑性変形によって緩和されてしまうため

に, 張力を除いた後には, 心金および銅中に, それぞれ軸方向の張力歪, 圧縮歪が残存している。また銅はその際の加工のために加工硬化を起し, E_2, P_0 はおそらく大きくなっているであろう。

このような試料を加熱すると, 初め弾性式(4), ついで塑性式(6)に従って膨脹する。200°C以上に加熱されて行くと, 銅の加工硬化が除かれ P_0 も低下するから心金の軸方向の張力歪が緩和されるので, ジュメットの熱膨脹が見掛上小さくなり, 試料M及びOに見られる異常膨脹が生ずると考えられる。曲線の形から推すと, 試料Oではこの緩和過程は約360°Cで終了しているが, 最初の心金の張力歪が最も著しい試料Mにおいては約440°Cで終了しているようである。このような試料の膨脹は図 9.a.3 の QRM で表わされ, Q点がJ点より上方にあるほど心金の張力歪が大きいと考えられる。試料I

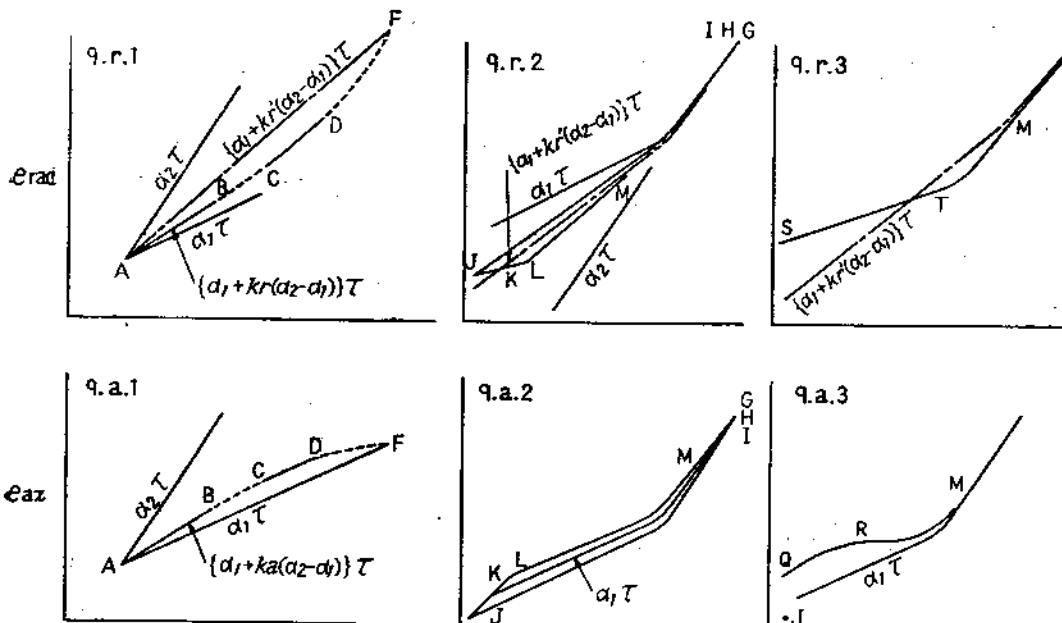


図9. ジュメット線の熱膨脹特性の説明図

Schematic explanation of expansion characteristics of Dumet wire
9.r.: Radial expansion
9.a.: Axial expansion

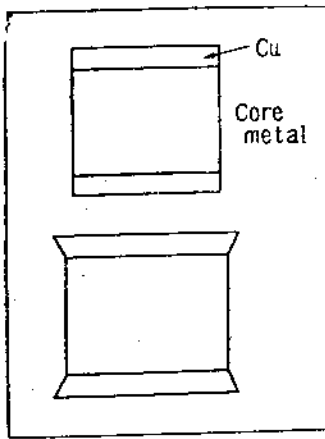


図 10. 実際のジュメット線の熱膨脹
Schematic representation of thermal expansion of Dumet wire with finite length
Above: At room temperature
Below: At high temperature

4.3 半径方向の熱膨脹

図 7 において、実線は弾性式 (3) に従う熱膨脹を示したものである。理論と実測の一致は良い。また、360°C 以上における膨脹においても理論と実測はよく一致する。しかるに膨脹曲線全体を調べて見ると、実測値の方がいずれの試料でも、3~7 μ /cm 小さいのである。すなわちこの不一致は 150°C~350°C の間で生じていると考えられる。この不一致の原因はすべて測定誤差によるものとは考えられない。この原因となり得る事項を列举して見よう。

(イ) 銅の塑性流動 高木氏、水池氏の理論では、ジュメット線のすべての部分で e_2 が等しいと仮定している。この仮定は試料が十分長く、また両端を固めてしまった場合に成立つ。筆者が軸方向の膨脹を測定した試料がこの場合に相当する。しかし、試料が十分長くない時には図 10 下図で示したような塑性変形が起り、半径方向の熱膨脹が小さくなる。

(ロ) 銅の加工硬化 銅が加工硬化を生じ、 P_0 が増大しているため、その膨脹曲線は図 9.r.2 の JKLM の代りに図 9.r.3 の STM で示される。すなわち弾性域の温度範囲が大きくなっている。

(ハ) ジュメット線内の機械歪 心金と銅との弾性常数が異なるから、線内の機械的歪力は体積変化の原因になりうる。測定時加熱されて歪力が変化したり、さらに消滅すると、体積変化が回復し、この影響が熱膨脹による体積変化に重なる。

(ニ) 加熱処理による銅、心金の密度変化 金属は加熱処理によりその結晶の成長等のため密度の変化する場合がある。

以上に挙げた原因の中 (ロ) または (ハ) 単独で、理論

および J もそれほど明瞭ではないけれども加工歪の影響が見られる。

加工歪のある試料の弾性域の温度範囲は、銅中の圧縮歪のために減少すると考えられるが、また一方 P_0 の増大のため増すと思われる。さらに P_r , P_0 によっても変わるので、簡単に予測することは出来ない。試料によって、この温度範囲がかなり異なることが

と実測の不一致を説明するためには、常温における P_0 として 100kg/mm² の程度の過大な値を仮定しなければならない。また J_{rad} は J_{ax} の数分の一に過ぎないので軸方向の膨脹に現われた加工歪の影響は、半径方向にはあまり著しくは現われない筈である。また (ニ) については心金についてのデータがないので何ともいえない。一番確からしい説明は不一致の大部が (イ) の原因により、一部が (ロ), (ハ) の原因によるものであろう。焼鈍されていない試料においては (ロ), (ハ) の原因が関与する割合が多少増すものと考えられる。

360°C 以上においては、心金と銅との膨脹係数の差が小さくなるので、銅中の塑性変形は著しくは生じない。したがってこの温度範囲では膨脹は再び理論式 (3) または (4) (弾性域と考えても塑性域と考えても結果的には同じである) に従って起るのである。

4.4 銅の塑性流動

4.3 において理論と実測の不一致を銅の塑性変形が原因であると説明した。したがって、銅の (見掛上の) 粘性係数が十分低いかどうかが問題になる。この点についてはすでに多くの測定があると思うけれども、筆者が行った実験結果を簡単に記す。還元焰中で焼鈍した電気銅線 (直径 0.8 mm ϕ) に 1 kg の荷重を加えて、各温度で伸びを測定したところ図 11 のようになった。これから各温度における粘性係数を計算すると図 12 のとおりである。

ガラスはその annealing point において粘性係数が $10^{13.0}$ (または $10^{13.4}$), strain point において $10^{14.6}$ (または $10^{14.6}$) であるとされている⁽⁸⁾。annealing point

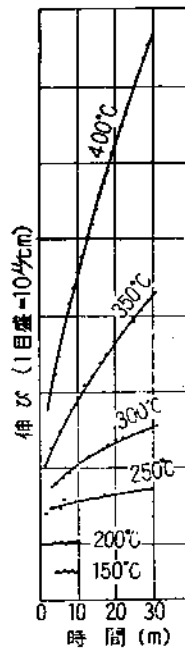


図 11. 電気銅線の張力による伸び (張力=2kg/mm²)
Elongation of electrolytic copper wires at various temperatures under tension of about 2kg/mm²

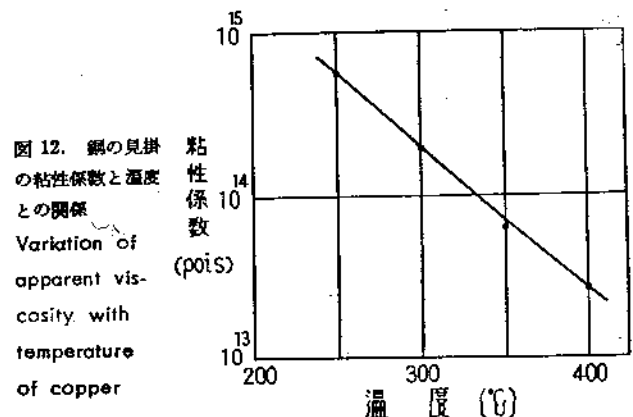


図 12. 銅の見掛の粘性係数と温度との関係
Variation of apparent viscosity with temperature of copper

は、ガラスの粘性流動がその歪力を速かに緩和する温度である。したがって図 12 の結果から、銅は高温において十分低い見掛けの粘性係数を有し、かなり速かな塑性変形を起すと考えられる。そうして、4.3 に述べた説明は reasonable なものである。

4.5 ジュメット封着の理論について

高木氏、水池氏によって提出されたジュメット封着の理論は、以上の実験結果から推して実験とかなりよく合うものと言ってよいが、実際のジュメット封着への応用に当っては、二三小さな点で補正を要するであろう。

封入に使われるジュメット線は有限な(短い)長さを持っているから、その半径方向の熱膨脹は理論値よりもやや低くなっていると予想される。また封着体の歪の緩和はガラスの粘性流動によるだけでなく、ジュメット線の銅外被の塑性変形によっても生ずる。この塑性変形はガラスの annealing point (通常のジュメット封着用ガラスの annealing point は 430~450°C である) よりも 150°C 以上低い温度でも生ずるものである。そうしてその塑性変形の速さは粘性係数で表わされるとすると、封着体中の歪はガラスの徐冷域におよる徐冷の仕方だけでなく、300°C 以下の温度範囲における冷却法にも影響されるであろう。すなわち銅の塑性変形の時間依存性をも取り入れる必要がある。これらの点について、さらに考察と実験を行い、理論を精密にすることが望ましい。

[V] 総 括

(1) 干渉膨脹計によって、実用ジュメット線の半径

方向の熱膨脹を一応満足すべき精度で測定することができた。

(2) 軸方向の熱膨脹も特別な膨脹計により精密に測定した。

(3) 軸方向の膨脹においては、加工歪の影響が著しいことが見出された。しかし焼鈍して加工歪を除いた試料では、膨脹曲線は理論的に予期されるものと一致した。

(4) 半径方向の熱膨脹は理論値よりやや小さく測定された。これは銅外被の膨脹の仕方が理論で仮定したものと異なるためと推定された。

(5) 比較的低温における銅外被の塑性流動の速さも、封着体中の歪の緩和に影響するものと考えられる。

文 献

- (1) 高木通泰：東芝レビュー 5 p.149 (1950).
- (2) 水池 敦：電気通信学会誌 35 p.274 (1952).
- (3) A. W. Hull; E. E. Burger; Physics 5 p. 384(1934).
- (4) 池田 豊：上関栄蔵：電気通信学会誌 33 p. 90 (1950).
- (5) G. E. Merritt; Jour. Res. National Bureau of Standard 10 p. 59 (1933).
- (6) J. B. Saunders; Jour. Res. National Bureau of Standard 23 p. 179 (1939).
- (7) 芝 亀吉：物理常数表 p. 113 より引用.
- (8) H. R. Lillie; Jour. Amer. Ceram. Soc. 14 p. 502 (1931).
Jour. Amer. Ceram. Soc. 37 p. 111(1954).