アルミニウム合金展伸材の動的弾性係数の温度依存性*

—振動法による測定 (第2報)—

入交 裕**・財満 鎮雄***・竹内洋一郎***・田丸 一男**

Temperature dependence of dynamic elastic moduli of wrought
aluminum alloys*

—Measurement by a resonant frequency method (2nd report)—

UDC 669.715-12:539.32

NEWKO Hiroshi**, ZAIMA Shigeo***, TAKEUTI Yoitiro*** and TAMARU Kazuo**

Temperature dependence of dynamic elastic moduli of wrought aluminum alloys was studied by a resonant frequency method and the measured dynamic moduli were compared with the moduli determined by an ultrasonic method, reported in the previous paper. It was found that the elastic moduli weakly and linearly depended on the temperature below 250°C and that they decreased intensely with increasing temperatures above 250°C. Temperature dependence of the elastic moduli was nearly same for all the tested alloys within an experimental error. In terms of elastic moduli at room temperature, wrought aluminum alloys were classified into the following three groups: high strength alloys such as 2024-T4, 2024-0 and 2017-T4 with Young's modulus of $(7.16 \sim 7.39) \times 10^5$ kg/cm², such alloys as 2011 and 5052-0 with smaller Young's modulus of $(6.54 \sim 6.17) \times 10^5$ kg/cm² and such alloys as 2017-0, 5056-0 and 1100-0 with intermediate Young's modulus. A very close agreement between the modulus determined by a resonant method and that determined by an ultrasonic method was found for 2017-0, 2024-T4 and some other alloys. However, 2011-T3 and 2017-T4 alloys showed a difference between the moduli determined by the above two methods. This was considered due to the difference of measurement principles and of hypotheses or assumptions involved in calculations. This conclusion, therefore, suggests that elastic moduli should be reported with a clear indication of a measuring method.

(Received July 31, 1972)

1. 緒 言

アルミニウム合金展伸材を室温以上の温度領域で利用することが多くなっているが、その強度問題の基礎となる弾性係数の温度依存性に関する資料に乏しいので、さきに超音波反射法によつて各種展伸材の動的弾性係数、すなわち、縦弾性係数 E 、横弾性係数 G およびポアソン比 ν を同時測定し、それらの温度依存性を400°Cまでの範囲で求めた¹⁾。本報では、前報でえられた値およびその温度依存性を対比するため、片持形振動片に振動を与えて共振時の振動周波数を求める共振法²⁾を利用して縦弾性係数を測定した結果を報告し、アルミニウム合金展伸材の強度問題基礎資料にするのを目的とした。

2. 測定理論

棒の横振動に関する基礎式は、断面二次モーメントを I 、密度を ρ 、曲げたわみを y 、断面積を A 、重力加速度を g とすれば

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = -\frac{\rho A}{g} \frac{\partial^2 y}{t^2} \quad (1)$$

ここで、 $y = Y(x) \cdot e^{i\omega t}$ とすれば

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 Y}{dx^2} \right) = \frac{\rho A}{g} \omega^2 Y \quad (2)$$

長さ l なる一様断面の棒を考えると、

$$\frac{d^4 Y}{dx^4} = \frac{\lambda^4 Y}{l^4}$$

* 本報は軽金属学会第42回春期大会 (47-5-10) にて講演した。

** 阿南工業高等専門学校 (阿南市) Anan Technical College. (Anan)

*** 静岡大学工学部 (浜松市) Faculty of Engineering, Shizuoka University. (Hamamatsu)

**** 森精機株式会社 (奈良市) Mori Seiki Co., Ltd. (Nara)

Table 1 Chemical compositions

Element Material	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	Zn (%)	Cr (%)	Pb (%)	Bi (%)	Al (%)
1100	0.12	0.37	0.67	0.02	0.03	0.02				bal
2011	5.40	0.13	0.20	0.42		0.06		0.49	0.52	bal
2017	4.03	0.31	0.32	0.48	0.56	0.04	tr.			bal
2024	4.52	0.25	0.22	1.48	0.58	0.06	0.12			bal
5052	0.10	0.25	0.20	2.51	0.12	0.08	0.25			bal
5056	0.05	0.15	0.18	5.18	0.10	0.04	0.09			bal

Table 2 Mechanical properties of specimens used.

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Vickers hardness Hv
1100-0	10.1	4.5	43.0	34.0
2011-T3	39.2	30.8	16.2	117
2011-T6	40.8	27.9	17.0	109
2011-T8	42.1	31.8	12.5	118
2017-0	18.8	8.0	23.5	43.7
2017-T4	46.6	30.5	23.2	112
2024-0	19.9	8.2	23.0	48.2
2024-T4	49.0	34.5	19.5	121
5052-0	19.6	9.1	28.2	48.5
5056-0	29.5	15.7	34.8	72.8

Fig. 1 Illustration of a specimen.

Fig. 2 Specimen shape.

$$\omega_n = \left(\frac{\lambda_n}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (6)$$

$$(n = 1, 2, 3, 4, \dots)$$

Fig. 1 のように、振動体を幅 B 、厚さ t の一様長方形断面とし、共振周波数を f_n とすれば $\omega_n = 2\pi f_n$ 、 $I_z = (1/12) Bt^3$ であるから(6)式から

$$E - \omega_n^2 \left(\frac{l}{\lambda_n} \right)^4 \frac{\rho A}{I_z} = (2\pi f_n)^2 \left(\frac{l}{\lambda_n} \right)^4 \frac{\rho Bt}{12}$$

$$= 4\pi^2 f_n^2 \frac{l^4}{\lambda_n^4} - \frac{12\rho}{t^2} \quad (7)$$

よつて、試料の有効長さ l 、密度 ρ 、厚さ t を測定し、共振周波数 f_n をレベルレコーダーに記録した曲線およびデジタルカウンタから読みとり、(7)式から縦弾性係数 E を求めることができる。

3. 実験方法

供試試料は **Table 1** に示す化学成分の6種類のアルミニウム合金展伸材で、それぞれ軟質材のほか熱処理を施したものなど10質別のもを採用した。それらの試料の2～3の機械的性質は **Table 2** のようであり、それぞれ **Fig. 2** の寸法形状に仕上げた。

測定装置ブロック図の **Fig. 3** に示すように、冷却筒内に励振電磁変換器とピックアップ電磁変換器を装備し

ただし、

$$\lambda^4 = \frac{\rho A \omega^2}{gEI} l^4 \quad (3)$$

上式の一般解は

$$Y = C_1 \sin \lambda \frac{x}{l} + C_2 \cos \lambda \frac{x}{l} + C_3 \sin h \lambda \frac{x}{l} + C_4 \cos h \lambda \frac{x}{l}$$

本実験では、境界条件が一端固定、他端自由であるから

$$\left. \begin{aligned} x=0 \text{ のとき } Y = \frac{dY}{dx} &= 0 \\ x=l \text{ のとき } \frac{d^2Y}{dx^2} = \frac{d^3Y}{dx^3} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

固有値決定式はつぎのようになる。

$$1 + \cos \lambda l \cdot \cos h \lambda l = 0 \quad (5)$$

この根は

$$\lambda_1 = 1.875, \lambda_2 = 4.694, \lambda_3 = 7.855, \lambda_4 = 10.966$$

(3)式より固有円振動数は

た装置支持台上端に試料を取付ける。 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 気圧の真空中で適当な測定温度に保持し、試料の3点(上部, 中央部, 下部)が定常温度状態になった後、試験片を振動させる。励振振動数とそのときの試験片振幅を同時記録し、共振時の振動数を求めたが、基本振動数から三次共振振動数までは容易に測定できるものの、四次は測定困難であつた。なお、**Photo 1 (a)** は試料の取付けと3点温度測定用の熱電対を装置した状態を示し、**(b)** はその外側に石英管、電気炉をかぶせて実験状態にした場合

の外観を示すものである。

4. 測定結果

室温から 400°C まで適宜温度を上昇させて、各試料について縦弾性係数 E の温度依存性を求めた。**Fig. 4** は 1100-0材についての測定結果であるが、図にもみるように共振法による二次と三次の共振振動数より求めた値がそれぞれほぼ近い値を示したので、以下の結果は二次と三次の結果の平均を示してある。また、図には超音波法による前報の結果⁷⁾も併記した。いずれも大体近い値を示しているが、一般的にいえばこの場合のように共振法の値がやや高い値を示すことが多く、試料によつては後述のように室温 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ の範囲では超音波法の方がやや高い傾向を示すこともあつた。

A: Electric furnace	B: Quartz tube
C: Supporting arm	D: Test specimen
E: Thermocouples	F: Pick-up transducer
G: Exciter transducer	H: Electric heater
I: Cooling water	J: Vacuum pump
K: Oscillation analyser	L: Beat frequency oscillator
M: Thermometer	N: Automatic temperature controller

Fig. 3 Illustration of the experimental apparatus.

Fig. 4 Temperature dependence of elastic module of 1100-0.

(a) Arrangement of holding a specimen

(b) External aspect of a furnace

Photo 1 Experimental apparatus.

2011, 2017および2024材についてはそれぞれ **Fig. 5**, **Fig. 6** および **Fig. 7** のようになる。2011では T3, T6 および T8 処理による縦弾性係数の差はほとんど認められず、また、前報で求めた超音波法での T3 処理の値が 200℃ 以下で共振法の値よりかなり大きくなっているのが注目される。Fig. 6, Fig. 7 にもみるように、一般にO材に比べてT材の縦弾性係数の値がやや高いが、いずれの場合も温度上昇に伴ってある程度の低下はまぬがれな

Fig. 5 Temperature dependence of elastic module of 2011.

Fig. 6 Temperature dependence of elastic module of 2017.

Fig. 7 Temperature dependence of elastic module of 2024.

いようである。このうち2024材は実験範囲ではほかの材料に比べて縦弾性係数の低下も少なく、温度依存性の少ない材料であつた。

また、**Fig. 8**, **Fig. 9** はそれぞれ 5052, 5056 の測定結果である。高力合金2017, 2024に比べれば全体として縦弾性係数はやや低い値であるが、温度依存性の傾向は等しいようである。

5. 結果の検討

Fig. 4~Fig. 9 の測定結果を通じてみれば、材料別によつて縦弾性係数の値の大小の差はあるが、250℃ 前後での縦弾性係数の温度依存性の傾向が大きく異なり、250℃ 付近までは温度上昇に伴う縦弾性係数の低下傾向は比較的ゆるやかな勾配の直線的であるものの、250℃ をすぎた後には縦弾性係数の低下は急増する。従つて、アルミニウム展伸材を 250℃ 以上で使用する場合には、常温の値に対し縦弾性係数は15~25%の低下が認められるので、使用条件によつては注意が肝要である。いま、250℃ 以下の温度範囲において、直線に近似している縦弾性係数の低下曲線を最小自乗法を用いて直線表示すれば **Fig. 10**, それらの直線勾配は **Table 3** のようになる。それらの低下直線はほぼ平行線的であり、直線勾配は $-2.5 \times 10^{-3} \sim -3.1 \times 10^{-3}$ の範囲にあり、常温にお

Fig. 8 Temperature dependence of elastic module of 5052-0.

Fig. 9 Temperature dependence of elastic module of 5056-0.

ける縦弾性係数は 2024-T4, 2024-0 および 2017-T4 材などの高力合金で $E = (7.16 \sim 7.39) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と比較的大きいグループと、2011材, 5052-0材など $E = (6.54 \sim 6.71) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と比較的小さいグループおよび 2017-0, 5056-0, 1100-0などの中間グループと大きく三グループに大別されることが判る。そして、各グループとも直線勾配はほぼ近い値を示しているの、200℃ 付近で使用する場合は前記第 1 グループの縦弾性係数が大きいといえる。

いま、常温における縦弾性係数 E の値を超音波法によ

Fig. 10 Summation of temperature dependence of elastic module of wrought aluminum alloys.

Table 3 Dropping tangent of modulus of elasticity with temperature rise

	Modulus of elasticity $E \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	Dropping tangent m
1100-0	6.94×10^5	-2.5×10^{-3}
2011-T3	6.54	-2.7
2011-T6	6.63	-2.7
2011-T8	6.65	-2.8
2017-0	7.16	-2.7
2017-T4	7.27	-2.7
2024-0	7.39	-3.0
2024-T4	7.33	-2.7
5052-0	6.71	-3.1
5056-0	6.89	-3.0

る前報¹⁾の値ならびに従来示されているデータ^{3),4)}と比較すれば **Table 4** のようになる。たとえば 2011-T3, 2017-T4 などのように同一材料で共振法と超音波法の測定法によって多少の差があるのは測定原理ならびに測定原理における近似の相違、試料加工方法の相違による影響などによつて差があらわれたものと思われるが、1100-0, 2017-0, 2024-T4など非常に近い値を示すものも認められる。また、表にもみるように同一材料によつては F 材, T材などに差がないとするもの³⁾、純アルミニウムでは $E = 6.89 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であるほかはアルミニウム合金はすべて $E = 7.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とするもの⁴⁾ などが認められているが、これらの場合には測定法が明示されていない。しかし、以上の結果より判断しても、縦弾性係数を測定する方法によつてその値がかなり異なることがあると思われるので、データブックには測定法を明示することが望ましい。

本報で取扱った試料のなかで、縦弾性係数の温度依存性に関する従来のデータが示されている³⁾ 該当材料について、それぞれ近い温度領域のものをピックアップして、共振法の結果と比較すれば **Table 5** のようになる。

Table 4 Comparison of elastic modulus in various measuring methods

Material	Elastic modulus, E (kg/cm ²)			
	Resonant frequency method	Ultrasonic method	In other data books	
1100-0	6.94×10^5	6.83×10^5	7.0×10^5	6.89×10^5
2011-T3	6.54	7.49	7.1	7.1
2011-T6	6.63			
2011-T8	6.65			
2017-0	7.16	6.98	7.3	
2017-T4	7.27	6.76		
2024-0	7.39	7.74	7.4	
2024-T4	7.33	7.26		
5052-0	6.71			
5056-0	6.89	6.59		

Table 5 Elastic modulus at several temperatures.

Material	Resonant frequency method			In other data books		
	20℃	150℃	250℃	24℃	150℃	260℃
1100-0	6.94×10^5	6.53×10^5	6.26×10^5	7.0×10^5	6.68×10^5	5.62×10^5
2017-0	7.16	6.83	6.43	7.3	7.00	5.90
2024-0	7.39	7.01	6.70	7.4	7.07	5.98

150℃ までの場合には減少変化の傾向はほとんど似ているが、250℃ をこえれば共振法による値の低下に比べて従来のデータでは表にもみるようになりかなりの低下が示されている。やはり、この場合も前述のように測定法の差違の影響があらわれているものと思われる。

6. 総 括

以上、共振法によつてアルミニウム合金展伸材の縦弾性係数 E を求め、その温度依存性を20～400℃の範囲で検討し、併せて前報で求めた超音波反射法による縦弾性係数の値と比較した。その結果を要約すれば、

(1) アルミニウム合金展伸材の縦弾性係数は温度上昇とともに低下傾向を示すが、250℃ 付近の温度までの低下はわずかで、その低下もゆるい勾配の直線的である。しかし、250℃ を越えるとその低下傾向は大きく変化し、温度上昇とともに減少割合も大きくなり、常温の場合の値に比べて15～25%の低下が認められるので、使用条件によつては注意が肝要である。

(2) 実験範囲では、250℃ までの減少直線の勾配は $(-2.5 \sim -3.1) \times 10^{-3}$ の範囲にあり、各材料の低下減少傾向はほぼ平行的である。常温における値をみれば、2024-T4, 2024-0, 2017-T4材などの高力合金で $E = (7.16 \sim 7.39) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と比較的大きい縦弾性係数を示すグループと、2011, 5052-0材など $E = (6.54 \sim 6.71) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と比較的小さいグループおよび2017-0, 5056-0, 1100-0材などそれらの中間の値を示すグループと大きく区分できた。

(3) 前報の超音波反射法による縦弾性係数の値と比較

してみれば、2017-0, 2024-T4材など両測定法による値が非常に近い値を示す場合もあったが、2011-T3, 2017-T4材などのように測定法によつて多少の差が認められる場合もあり、それらの温度依存性にかかるの差があることもあった。これは測定原理、測定理論上の仮定、近似の差など種々の原因が考えられるので、縦弾性係数の値を表示する場合には、測定法を明示することが望ましい。

(4) また、従来発表されたデータは少ないが、それらの値、温度依存性などと、本報の結果とも比較した。それらのデータと全然矛盾する結果はえられなかったが、たとえばF材、T材の差など細かい検討がされていないようであつたので、熱処理などによつても縦弾性係数が変化する場合があることを示した。

本報の実施に当たり、(社)軽金属協会アルミニウム技術振興委員会静水圧研究グループ各位の多大の御援助をいただいた。また、試料入手には住友軽金属工業㈱竹内勝治氏、日本軽金属㈱前川忠男氏の一方ならぬ御好意に負う処が大きい。付記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 財満, 竹内, 入交: 軽金属, **21** (1971), 803.
- 2) たとえば, F. Garofalo: Proc. ASTM, **60** (1960), 738.
- 3) たとえば, 軽金属協会編: アルミニウムハンドブック, (昭38, 朝倉書店), 246.
- 4) たとえば, 日本金属学会編: 金属便覧 (昭36, 丸善), 20.