高弾性合金 “Dia-flex” 単結晶の弾性係数の異方性ならびにその温度変化*

増 本 量** 斎 藤 英 夫*** 菊 地 紀 雄**

Hakaru Masumoto, Hideo Saitô and Michio Kikuchi: On the Elastic Anisotropies and its Temperature Change of Single Crystals of High Elasticity Alloy “Dia-flex” in the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo System. The thermal expansion in the temperature range of 0° to 800°C, Young's modulus in the temperature range of -50° to 300°C, rigidity modulus in the temperature range of 10° to 50°C and the mechanical strength at room temperature in a high elasticity alloy of F.C.C. type “Dia-flex” consisting of 38.0% Co, 22.4% Fe, 16.5% Ni, 12.0% Cr, 4.0% W, 4.0% Mo and small amounts of other elements were measured with the single crystals and annealed poly-crystals (in the predominant direction $\langle 112 \rangle$ ($1\bar{1}0$): Young's modulus 23.00×10^5 kg/cm², elastic limit 120 kg/mm² and tensile strength 250 kg/mm²). Then, from the data obtained, the volume compressibility, the principal elastic parameters S_{ij} , the principal elastic constants C_{ij} , and Young's modulus and the rigidity modulus in three principal orientations of the single crystals were calculated. From the result it has been known that Young's moduli at 20°C are 11.68×10^5 kg/cm², 22.49×10^5 kg/cm² and 33.78×10^5 kg/cm², and the rigidity moduli at 20°C, 12.01×10^5 kg/cm², 5.93×10^5 kg/cm² and 5.33×10^5 kg/cm² respectively in the orientations of $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ of the single crystals, showing high anisotropies of elastic moduli. The anisotropy of the temperature coefficients of elastic moduli is also very high.

(Received September 7, 1966)

I. 緒 言

一般に時計の動力ゼンマイなどは高い引張強さ, 高い弾性限, 高い耐食性などを必要とし, その材料としては, 現

在多くは適当に加工熱処理された Co, Fe, Ni, Cr, W, Mo などを中心とする合金 (たとえば Elgiloy⁽¹⁾), すなわち多元素面心立方格子型合金が使用されている。もちろんこれらの合金も結晶異方性が大いなので, その優位方向ができるだけ使用方向に一致するように加工方法や熱処理法についても従来多くの研究が行なわれている⁽²⁾。しかし単結晶

(1) 米 Elgin 社製 40 Co-25 Cr-22 Ni-0.03 Be-(0.15 ~ 0.20) C-2 Mn-Bal. Fe 合金

(2) M.F. Straumann: Soc. Suisse de Chronom., (1954), 209; M.E. Dubois: Soc. Suisse de Chronom., (1954), 215; 佐藤, 池田, 鎌田: 日本時計学会誌, 12 (1961), 39 など。

** 財団法人電気磁気材料研究所 (The Foundation: The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, Sendai)

*** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals Tôhoku University, Sendai)

* 1964 年 10 月本会富山大会に発表; 財団法人, 電気磁気材料研究所論文 No. 15.

によつて弾性係数とその異方性を決定した例はまだないように思われる。よつて著者らは Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo 系高弾性合金 “Dia-flex”⁽³⁾ (使用状態における ヤング弾性率は $23.00 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 弾性限は 120 kg/mm^2 , 引張強さは 250 kg/mm^2 である) の単結晶を製造し, 焼鈍状態におけるヤング弾性率とその温度変化を測定した。さらにこれに基づいて種々の理論式から多結晶に対するヤング弾性率を計算して実測値と比較した。また室温付近の剛性率をも測定して弾性常数を求めた。

II. 試料および測定方法

1. 試料

単結晶は 38.0% Co, 22.4% Fe, 16.5% Ni, 12.0% Cr, 4.0% Mo, 4.0% W, 1.2% Mn, 1.0% Ti および 0.8% Si から成る高弾性合金の直径 2 mm の線材を内径 3 mm の特殊ルツボ中に入れ, 真空中で溶かし, タンマン-ブリッジマン法⁽⁴⁾によつて製造した。数多くの試作の結果この合金でも通常の面心立方格子合金の場合と同様に, 最も得やすい方位は $\langle 100 \rangle$ 方向⁽⁵⁾で, 単結晶成長の最適降下速度は 5.0 mm/min であることが判つた。しかし $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 方向の結晶を得ることはこの方法だけでは非常に困難であつたので, これに $\langle 100 \rangle$ 結晶を適当な角度で種として接ぎ, 結晶を成長させた。その最適降下速度はそれぞれ 4.0 mm/min , 3.7 mm/min であつた。この方法で造つた単結晶はときどき内部に気泡などを含むこともあるので, 密度を測定してその固有値からはずれるものは測定から除外した。かくして長さ 15~20 cm, 直径 3 mm 程度の円棒状の単結晶を製造することができたが, 測定の都合上試料の長さはすべて 12 cm に統一した。その結晶方位は試料を沸騰した塩化第二鉄過飽和溶液に 10 分間, または稀薄王水に 2 分間浸漬腐食して光像法⁽⁴⁾⁽⁶⁾によつて決定した。また直径約 3 mm の多結晶試料の弾性係数および直径約 0.5 mm の多結晶試料の剛性率を測定したが, いずれの場合にも準等方的な試料を得るために溶融合金を結晶の成長しない程度の速さで凝固させた。つぎに試料はすべて歪を除くために真空中で再結晶の起らない温度 800°C で約 1 hr 焼鈍した。製造した全単結晶試料のステレオ投影⁽⁷⁾による方位分布は Fig. 1 に示すとおりである。図中番号を付した試料のみが測定に供され, その方位は Table 1 にまとめている。

2. 測定方法

熱膨張の測定は Super-Invar 製縦型全膨張計⁽⁸⁾および横

型全膨張計により $0^\circ \sim 800^\circ\text{C}$ の範囲で行なつて平均の線膨張係数を定め, 密度は水中秤量法によつて求めた。ヤング

Fig. 1 Stereographic projection of orientation of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy (Specimen No. 1~10).

Table 1 Direction cosines of the rod axis of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy used.

Specimen No.	α_1	α_2	α_3
1	54.21	55.30	48.28
2	54.00	56.30	47.52
3	55.30	55.30	53.14
4	45.30	84.30	45.02
5	46.25	85.00	44.02
6	82.30	83.50	9.58
7	88.30	89.00	1.48
8	87.00	88.30	2.48
9	89.00	89.50	1.06
10	89.00	89.00	1.31

弾性率は静電駆動方式⁽⁹⁾の装置により $-50^\circ \sim 300^\circ\text{C}$ の温度で試料の固有振動数 ($600 \sim 800 \text{ c/s}$) を求め, 熱膨張係数および密度の測定値を用いて算出した。つぎに剛性率の測定は直径 0.5 mm の多結晶試料を用い, 振り振子法⁽¹⁰⁾により $10^\circ \sim 50^\circ\text{C}$ で行なつた。引張強さは焼鈍状態の試料を用いインストロン試験機によつて荷重 200 kg から最大 2000 kg の範囲で測定した。

III. 研究結果ならびに考察

1. 熱膨張

$\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 方向に最も近い方位をもつ 3 ケの試料について 0°C から 800°C までの範囲で行なつた熱膨張の測定結果は Fig. 2 に示してある。図に見るように熱膨張は全く等方的でいずれの方位の曲線も 558°C に明瞭な折点を示す。これはわずかに残存する磁気がこの温度で消失するためではないかと思われる。またこの

(8) 増本, 小林: Sci. Rep. RITU, A 2 (1950), 856; 本誌, 12 (1948), No. 6-1.

(9) 白川, 小熊: 本誌, 24 (1960), 63.

(10) 増本, 斎藤: 本誌, 16 (1952), 126; P. Chevenard: Trav. et Mém du Bur. Int. des Poids et Mesures, 17 (1927), 44.

(3) 増本, 斎藤, 小林: 日本特許第 230713 号 (昭和 31 年 12 月 14 日)。

(4) 山本: 東北帝大理科報告, 29 (1940), 113; 本誌, 4 (1940), 368.

(5) 山本: 本誌, 4 (1940), 27, 168, 222.

(6) 山本: 本誌, 5 (1941), 214; 応用物理, 10 (1940), 199.

(7) 山本: 金属物理, 6 (1960), 118; C.S. Barrett: The Stereographic Projection, AIME Techn. Publ., No. 819 (Met. Techn., 4 (1937), No. 5).

折点の両側における曲線はほとんど直線で、低温側における線膨張係数は 13.40×10^{-6} 、高温側における値は $15.71 \times$

Fig. 2 Thermal expansion $\Delta l/l$ of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

10^{-6} となる。これらの値は多結晶試料についても同様である。

2. ヤング弾性率ならびに剛性率

Fig. 3 はヤング弾性率 E の実測値と温度との関係を示すが、 E の異方性は非常に大きい。しかしこれらの実測値だけでは任意の方向の値を知ることができないので、等軸晶系結晶に関するつぎの計算式⁽¹¹⁾ によつてこれを求めることにする。

$$\frac{1}{E} = S_{11} - 2(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2}S_{44})(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) \quad (1)$$

Fig. 3 Temperature change of Young's modulus E of single crystals and a poly-crystal of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

ここに S_{ij} は弾性パラメーターで、 $\alpha_i \alpha_j$ は結晶軸に対する棒軸の方向余弦である。また $\Sigma \alpha_i^2 \alpha_j^2$ は方向函数で、その値は $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 方向においてそれぞれ $0, 1/4, 1/3$ となる。Fig. 4 は $1/E$ と $3 \Sigma \alpha_i^2 \alpha_j^2$ の関係を

Fig. 4 Relations between reciprocals of Young's modulus E and rigidity modulus G and the orientation function $3(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2)$ of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

表わしたもので、測定点はほぼ一直線上に乗る。したがつて式(1)が正しいものとして E の実測値を用い最小二乗法によつて S_{11} および $S_{11} - S_{12} - (1/2)S_{44}$ の値を求めることができる。さらに、3 主要軸を含む (110) 面内での E の値を計算する。この面では

$$(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) = \frac{1}{4}(1 + 2\cos^2\theta - 3\cos^2\theta) \quad (2)$$

である。ここに θ は $[001]$ 方向と試料の棒軸との角度である。式(1)にこれを適用して任意の方向の E を計算することができる。いま計算によつて求めた S_{11} および $S_{11} - S_{12} - (1/2)S_{44}$ と温度との関係、3 主要方向に対する E と温度との関係および (110) 面上における $-50^\circ, 20^\circ$ および 300°

Fig. 5 Temperature change of calculated values of elastic parameters S_{11} and $S_{11} - S_{12} - (1/2)S_{44}$ of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

(11) W. Voigt: Lehrbuch der Kristallphysik (B. G. Teubner Leipzig), (1928), 739, 741, 410; W.A. Wooster: Crystal Physics (Cambridge), (1938), 1.

の温度の E と方位との関係を示すと、それぞれ Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 のようになる。すなわち E は Fig. 6

にみるようにどの方向でも -50°C から 20°C 付近まではほぼ直線的に、ついで抛物線的に減少しいずれの温度にお

Fig. 6 Temperature change of calculated values of Young's modulus E in three principal orientations of single crystals and a polycrystal of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy, and elastic anisotropies E_a ($E_{\langle 111 \rangle} / E_{\langle 100 \rangle}$) and G_a ($G_{\langle 100 \rangle} / G_{\langle 111 \rangle}$).

Fig. 7 Calculated values of Young's modulus E , rigidity modulus G and their temperature coefficients e and g of various orientations in (110) plane of single crystals of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

いても $\langle 111 \rangle$ 方向で最大値をとり、 $\langle 100 \rangle$ 方向で最小値を示す。すなわち等軸晶系における各主要方位のヤング弾性率間の関係式

$$E_{\langle 111 \rangle} > E_{\langle 110 \rangle} > E_{\langle 100 \rangle} \quad (3)$$

によく合致する。とくに $\langle 111 \rangle$ 方向の E は $33.78 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (20°C) なる値を示し、現在市販の動力ゼンマイが長手方向に主として $\langle 112 \rangle$ ($\bar{1}\bar{1}0$) 方向をもちその E の値が $23.00 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ⁽¹²⁾ であることを考えあわせると応用

上注目すべき値である。なお Fig. 6 には $E_{\langle 111 \rangle} / E_{\langle 100 \rangle}$ の温度による変化も曲線で示しておいたが、普通の fcc 純金属に比べてかなり大きく⁽¹²⁾ 20°C で 2.89 で、 300°C では 3.18 である。また (110) 面上における各方向の E の $0^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{C}$ での平均温度係数、 $e_{0^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{C}}$ は Fig. 7 に、各主要軸方向の $0^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{C}$ および $-50^{\circ} \sim 300^{\circ}\text{C}$ での平均温度係数は

Table 2 Calculated values of Young's modulus E , rigidity modulus G and their temperature coefficients e and g in three principal orientations of single crystals and volume compressibility κ of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

	E ($\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)	G ($\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)	κ ($\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$)	e ($\times 10^{-5}$)	g ($\times 10^{-5}$)
	20°C			$0^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{C}$	$-50^{\circ} \sim 300^{\circ}\text{C}$
$\langle 100 \rangle$	11.68	12.01	—	-36.20	-39.32
$\langle 110 \rangle$	22.49	5.93	—	-23.25	-29.26
$\langle 111 \rangle$	33.78	5.33	—	-14.76	-20.16
Poly-crystal	18.99	6.50	0.0270	-18.22	-30.48

Table 2 にまとめてある。

つぎに準多結晶体に対するヤング弾性率の値は、すべての結晶粒における歪力状態が等しいと仮定して歪力成分 S_{ij} の平均を用いると、ReuB⁽¹³⁾ にしたがって

$$E_p = \frac{5}{3S_{11} + 2S_{12} + S_{44}} \quad (4)$$

で与えられる。この式によつて計算した E_p (calculated) の値と溶融後徐冷した準多結晶試料について実測した E_p (measured) の値とを比較すると Fig. 6 のようになるが、両者はほとんど一致しておる。

つぎに測定した剛性率 G の温度変化の様子は Fig. 8 に示すように E の場合と同様直線的に減少する。室温での G

Fig. 8 Temperature change of measured and calculated values of rigidity modulus G and calculated values of volume compressibility κ of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

およびその温度係数 g は Table 2 に示すとおりである。

さて、弾性パラメーターを全部決定するにはまづ体圧縮率 κ を知らねばならぬ。多結晶試料の κ と E および G との間には

$$\kappa = \frac{3(G - E)}{EG} \quad (5)$$

(12) 山本：本誌，6(1942)，331 たとえば Fe, Ni について比較されたい。

(13) A. ReuB: Z. angew. Math. u. Mechn., 9(1929), 49.

なる関係式があるので、これによつて κ を求めると Table 2 に示す値となる。また κ と S_{ij} との間には

$$\kappa = 3(S_{11} + 2S_{12}) \quad (6) \quad (11)$$

なる関係式が成立つので、まづ Fig. 5 に示す S_{11} の値を用いて S_{12} を求め、さらに同図に示す $S_{11}-S_{12}-(1/2)S_{44}$ の値から S_{44} を計算しこれらの値を Table 3 にまとめておいた。

Table 3 Calculated values of elastic parameters S_{ij} and elastic constants C_{ij} at 0° and 50°C of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

S_{ij}	$(\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg})$		C_{ij}	$(\times 10^5 \text{ kg/cm}^2)$	
	0°C	50°C		0°C	50°C
S_{11}	0.0889	0.0902	C_{11}	42.51	41.41
S_{12}	-0.0400	-0.0405	C_{12}	34.77	33.75
S_{44}	0.0849	0.0853	C_{44}	17.78	11.72

た。さらに主要弾性常数 C_{ij} を求めるにはつぎの関係式⁽¹¹⁾を用いればよい。

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \frac{S_{11} + S_{12}}{(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})} \\ C_{12} &= \frac{-S_{12}}{(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})} \\ C_{44} &= \frac{1}{S_{44}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

これによつて計算された 0°C および 50°C の C_{ij} の値は Table 3 にまとめてあるが、立方晶系における Cauchy の関係 $C_{12} = C_{44}$ ⁽¹⁴⁾ は全く成立しないことがわかる⁽¹⁵⁾。つぎに等軸晶系において主要軸方向に対する剛性率 G と S_{ij} との間には

$$\frac{1}{G} = S_{44} + 4(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2}S_{44}) \times (\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) \quad (8)$$

なる関係があるのでこれに前に求めた S_{ij} の値を代入すれば種々な方位および温度に対する G を求めることができる。その計算の結果は Fig. 7 および Table 2 に示してある。すなわち G は $\langle 100 \rangle$ 方向で最大で、 $\langle 111 \rangle$ 方向で最小である。このことは同じく立方晶の Fe あるいは Ni でも同様である⁽¹²⁾。20°C における $1/G$ と方向函数との関係は Fig. 4 に示したが、その曲線は当然一直線である。また 0°~40°C 間の G の平均温度係数 $g_{0^\circ \sim 40^\circ \text{C}}$ も G と同様 $\langle 100 \rangle$ 方向で最大を示し、 $\langle 111 \rangle$ 方向で最小を示す。 G の異方性 $G_{\langle 100 \rangle} / G_{\langle 111 \rangle}$ は広い温度範囲で測ることはできなかったが、Fig. 6 に示すように 20°C で 2.36、50°C で 2.38 で高温になるにしたがつて E と同様漸増する傾向にある。つぎに多結晶に対する G の値 G_p は S_{ij} との間に次式⁽¹³⁾が成立する。

(14) たとえば(11)で 410。

(15) Al で G.N.Kamm and G.A. Alers: J. Appl. Phys., **35**(1964), 327; Fe-Ni で G. A. Alers and J. R. Neighbours: J. Phys. Chem. Solids, **13**(1960), 40; Ta, W, Mo で F.M. Featherston and J.R. Neighbours: Phys. Rev., **130**(1963), 1324; その他種々比較したものとして R.F.S. Hearmon: Rev. Mod. Phys., **18**(1946), 432。

$$G_p = \frac{5}{4S_{11} - 4S_{12} + 3S_{44}} \quad (9)$$

この式によつて計算した G_p は Fig. 8 に示してあるが、溶解によつて得た試料の測定結果と大差はない。

3. 機械的強度

$\langle 100 \rangle$ に近い方向を有する No. 9, $\langle 110 \rangle$ に近い方向を有する No. 4, $\langle 111 \rangle$ に近い方向を有する No. 2 および多結晶の焼鈍状態における 20°C の弾性限、降伏点、引張強さを測定して Table 4 の値を得た。表でみるように

Table 4 Mechanical properties of single crystals and a poly-crystal of the Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo alloy.

Specimen No.	Elastic limit (permanent strain, 0.003%) (kg/mm ²)	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)
9	21.40	24.65	40.80
4	18.60	18.93	34.00
2	22.01	26.27	45.27
Poly-crystal	19.10	19.20	35.70

$\langle 111 \rangle$ 軸に近い方向の値は他の軸に比して最高の値を示している。

IV. 総 括

タンマン-ブリッジマン法によつて造つた Co-Fe-Ni-Cr-W-Mo 系高弾性合金 "Dia-flex" の棒状単結晶について、800°C から徐冷した状態で 0°~800°C の熱膨張、-50°~300°C のヤング弾性率、10°~50°C の剛性率および室温の機械的性質を測定してつぎの結果を得た。

(1) 単結晶を成長させるための最適降下速度は $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ 方向でそれぞれ 5.0, 4.0, 3.7 mm/min である。

(2) 単結晶について 0°~800°C 間で求めた熱膨張曲線は全く等方的であつて、いずれの方向でも 558°C 付近に明瞭な折点を示す。その折点上下の温度範囲における平均線膨張係数はそれぞれ 15.71×10^{-6} および 13.40×10^{-6} である。

(3) 計算による 3 主要軸方向および多結晶体のヤング弾性率は 20°C でそれぞれ $E_{\langle 100 \rangle} = 11.68 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $E_{\langle 110 \rangle} = 22.49 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $E_{\langle 111 \rangle} = 33.78 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ および $E_p = 18.99 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ で、 E_p の値は実測値とほとんど一致する。また $E_{\langle 111 \rangle} / E_{\langle 100 \rangle}$ は 20°C で 2.89, 300°C で 3.18 で、温度とともに増加する。

(4) ヤング弾性率の温度変化の模様は各方位とも互に類似しており、3 主要軸方向および多結晶体における 0°~40°C の平均温度係数はそれぞれ $e_{\langle 100 \rangle} = -36.20 \times 10^{-5}$, $e_{\langle 110 \rangle} = -23.25 \times 10^{-5}$, $e_{\langle 111 \rangle} = -14.76 \times 10^{-5}$ および $e_p = -18.22 \times 10^{-5}$ である。

(5) 20°C における主要弾性パラメーターは $S_{11} = 0.0894 \times 10^{-5}$, $S_{12} = -0.0402 \times 10^{-5}$, $S_{44} = 0.0850 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ である。

(6) 20°C における主要弾性 常数は $C_{11} = 42.09 \times 10^5$, $C_{12} = 34.35 \times 10^5$, $C_{44} = 11.75 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ でこの合金では $C_{12} = C_{44}$ なる Cauchy の関係は成立しない.

(7) 計算による 3 主要軸方向および多結晶体の剛性率は 20°C でそれぞれ $G_{\langle 100 \rangle} = 12.01 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $G_{\langle 110 \rangle} = 5.93 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $G_{\langle 111 \rangle} = 5.33 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ および $G_p = 6.50 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ で, G_p は実測値とほとんど一致する. また $G_{\langle 100 \rangle} / G_{\langle 111 \rangle}$ は 20°C で 2.36, 50°C で 2.38 で温度とともに増加する傾向にある.

(8) 3 主要軸方向および多結晶体における剛性率の 0° ~ 40°C の平均温度係数はそれぞれ $g_{\langle 100 \rangle} = -12.73 \times 10^{-5}$,

$g_{\langle 110 \rangle} = -29.27 \times 10^{-5}$, $g_{\langle 111 \rangle} = -29.38 \times 10^{-5}$ および $g_p = -28.40 \times 10^{-5}$ である.

(9) 0°C および 50°C での体圧縮率はそれぞれ $0.0265 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$, $0.0276 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$ である.

(10) $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ に近い方向 および多結晶体に対する引張強さは 20°C でそれぞれ 40.80, 34.00, 45.27 および 35.70 kg/mm^2 である.

終りに, 本研究遂行中装置の使用に多大の便宜をはかられた東北大学金属材料研究所の菅井 富氏, 同研究所共通試料室の各位ならびに測定に協力された電気磁気材料研究所の沢谷昭八氏に厚く感謝する.