純アルミニウムおよびアルミニウム合金の 変形抵抗の数式モデル

本村 貢*・島村 三郎**・西村 孝**

On relating the resistance to deformation
of commercial pure aluminum and aluminum alloy
to strain, strain rate and temperature

UDC 669.71 : 669.715 : 539.4

MOTOMURA Mitsugu*, SHIMAMURA Saburo** and NISHIMURA Takashi**

The resistance to deformation of commercial pure aluminum and aluminum alloys has been investigated experimentally by using a cam plastometer. Materials tested in this paper are A1070, A1050, A1100, A3003, A5052, Al-1.2%Cu(KD) alloy. The deformation resistance-strain curves of those materials have been determined over a temperature range 300~500°C, strain rate 1.0~12.0 sec⁻¹. The deformation resistance K_f was related to the true strain ϵ and the strain rate $\dot{\epsilon}$ through a power law, i.e., $K_f = K_n \epsilon^n$ and $K_f = K_m \dot{\epsilon}^m$. The relation between the deformation resistance K_f , temperature T , strain ϵ , strain rate $\dot{\epsilon}$ can be expressed not by the usual form; $K_f = K_0 \epsilon^n \dot{\epsilon}^m e^{A/T}$ but by the form; $K_f = (a+b/T+c/T^2) \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$, where a, b, c, n, m are constants dependent only on the material.

(Received May 19, 1976)

1. はじめに

金属材料の変形抵抗は、その加工のさいの荷重、トルクなどを算出するさいの基本データである。鉄鋼に関しては、変形抵抗に対するひずみ、ひずみ速度、温度、化学成分の影響が、多くの研究者^{1)~6)}によって詳細に調査されてきた。その結果は、圧延作業のコンピュータコントロールを初めとして、塑性工学の基礎データとして有効に活用されている。

純アルミニウムおよびアルミニウム合金材料に関しての変形抵抗も一部調査がなされている。しかし、ほとんどの研究は、純アルミニウム系材料の応力-ひずみ曲線の結果の報告である。変形抵抗の数式化については、動変形抵抗をひずみ速度に依存する関数として、AlderとPhillips⁶⁾、Samanta⁷⁾らによって表示されている。しかし、Alderらの式は、温度、ひずみがそれぞれ一定の場合に、Samantaの式は、ひずみ一定の場合に成立つもので、動変形抵抗をひずみ、ひずみ速度、温度の関数として総合表示されたものでない。

本研究は、純アルミニウムおよびアルミニウム合金の

熱間圧延の力学的解析を行なう基本データとして、それら材料について、変形抵抗に対するひずみ ($\epsilon = 0.1 \sim 0.6$)、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 1 \sim 20 \text{ S}^{-1}$)、温度 ($t = 300 \sim 500^\circ\text{C}$)の影響をカムプラストメータによって調査したものである。さらに、変形抵抗に対するひずみの依存性、ひずみ速度の依存性、温度の依存性をそれぞれ論じ、それらによる総合表示式について検討し、精度の高い実験式を誘導した。

2. 実験方法

2.1 実験装置および試験方法

金属材料の変形抵抗を求める方法は、高ひずみ速度の場合は落槌試験機やホプキンソンバー試験機などによる方法、低ひずみ速度の場合は万能試験機(インストロン型など)などによる方法がある。しかし、それらは一定ひずみ速度下における試験は困難であり、中ひずみ速度の変形抵抗を求めるには適当でない。

本研究においては、一定ひずみ速度で試験が可能なカムプラストメータを用いた。カムプラストメータは能力10 tonで、圧縮板を打撃するカムは変速機により500

* 早稲田大学理工学部(東京都)。Faculty of Science and Engineering, Waseda University (Tokyo).

** 早稲田大学理工学部大学院(東京都)。Graduate School of Science and Engineering, Waseda University (Tokyo).

rpm までと可変となっており、最高圧縮量は 6 mm である。試験片は、サブプレス (SKD 61) 内に入れた状態で、加熱炉によりサブプレスと試験片が所定温度になるまで加熱する。試験片はサブプレスごと炉出しをし、すぐさまカムプラストメータの下圧縮板上に設置し、手動にて上圧縮板とサブプレスとを密着させると同時に、カムを回転させて下圧縮板の打撃によつて、サブプレスごと試験片を加圧圧縮する。そのさいの荷重は、抵抗線ひずみ計を貼付した水冷式 10 ton 荷重計により検出し、変位は差動トランスで検出し、それらを増幅器を介しメモリスコープに記録し解析に供した。なお、潤滑剤はコロイド状黒鉛 (商品名ヒタゾール) を使用した。

2.2 供試材料

市販の工業用アルミニウム材料のうち、主に圧延に供せられている材料から第 1 段階として 6 種について選択した。今回供試した材料は、純アルミニウム系 3 種、Al-Mn 系 1 種、Al-Mg 系 1 種、それに Al-1.2% Cu(KD) の 6 種類で、それらの成分分析表を **Table 1** に示す。

これらの材料は、板厚 12~15 mm の R 材のものであるので、前加工履歴の影響を取り除くために、圧縮試験片に機械加工後に **Table 2** の熱処理を施し変形抵抗測定に供した。

2.3 実験条件

カムプラストメータによる一定ひずみ速度の変形抵抗を精度良く求めるには、高温および低速のひずみ速度で試験を行なつてはならない。モデル圧延における圧延速度を前提にすると、中ひずみ速度の試験が多いので、そのさいの変形抵抗はカムプラストメータで求めるのが最適である。したがつて、本研究においては、中ひずみ速度における純アルミニウムおよびアルミニウム合金の変形抵抗を求めるために **Table 3** の実験条件にした。

3. 実験結果

Photo 1 に、試験片をカムプラストメータで圧縮中の荷重-変位曲線の結果の一例を示す。試験片は圧縮後バレーリングを起こさないので、均一変形と仮定したさいの接触面積で荷重を除し変形抵抗とした。

Fig. 1~Fig. 6 に変形抵抗曲線を示す。横軸は対数ひずみ $\varepsilon = \ln(h_0/h_i)$ (h_0 : 試験片初期高さ mm, h_i : 圧縮中の試験片高さ mm) を表わし、縦軸は変形抵抗 $K_f = P_i/S_i$ (P_i と S_i は圧縮中の任意ひずみにおける荷重 kg と均一高形時の接触面積 mm²) を表わしている。また、ひずみ速度はそれぞれ 1.5, 4.0, 12.0 S⁻¹ の場合を表示している。図中の温度は圧縮開始温度℃を表わしている。

Table 1 Chemical composition of materials (%).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Cr	Al
A 1070	0.03	0.13	<0.05	0.01	<0.01	0.05	—	bal.
A 1050	0.24	0.28	<0.01	<0.01	—	—	—	bal.
A 1100	0.31	0.52	0.01	0.01	—	—	—	bal.
A 3003	0.18	0.46	0.13	1.01	—	—	—	bal.
A 5052	0.15	0.16	<0.01	<0.01	2.39	—	0.17	bal.
K D	0.27	0.49	1.20	<0.01	<0.01	0.04	0.006	bal.

Table 2 Heat treatment condition (×3 hr).

Material	A 1070	A 1050	A 1100	A 3003	A 5052	K D
Annealed temperature (°C)	350	360	360	410	370	410

Table 3 Condition of compression test.

Material	A1070, A1050, A1100, A3003, A5052, KD
Diameter × Height, $d_0 \times h_0$ (mm)	$\phi 10^{+0.05} \times 10^{+0.05}$
Slenderness ratio, d_0/h_0	1.0
Maximum reduction, Δh (mm)	6
Maximum reduction per., $r_{\max}$ (%)	60
Compression temperature, t (°C)	300, 400, 500
Strain rate, $\dot{\varepsilon}$ (s ⁻¹)	1.5, 4.0, 12.0
Number of test	3

Fig. 1 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum A1070.

Fig. 2 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum A1050.

Fig. 3 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum A1100.

Fig. 4 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum alloy A3003.

Fig. 5 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum alloy A5052.

Fig. 6 Experimental relation between deformation resistance and strain for aluminum alloy KD

Fig. 1 は A1070 の場合, Fig. 2 は A1050 の場合, Fig. 3 は A1100 の場合の変形抵抗曲線である。温度が 300~500℃の範囲においては、これら純アルミニウム系

の変形抵抗は、ひずみの増加にしたがつて増加する傾向をとり、その増加割合は、低温の場合の方が大きく、高温の場合はわずかとなっている。ひずみ速度に関して

Photo 1 Oscilloscope dual-trace record for dynamic compression.

は、低ひずみ速度の場合の方がその増加率は低い傾向を示している。

Fig. 4 は A3003 の場合の変形抵抗曲線である。圧縮温度が 400, 500°C の場合には、変形抵抗はひずみに関係なくほぼ一定で、弾完全塑性体の理想形に類似した形状をとる。温度 300°C の場合は、純アルミニウム系と同様にひずみの増加にともない変形抵抗は上昇していくが、その増加割合は純アルミニウム系に比べて小さい。

Fig. 5 は A5052 の場合の変形抵抗曲線であり、高い変形抵抗を示す材料である。500°C の試験温度での特性は、弾完全塑性体の形をとり A3003 と類似するが、さらに低温、高ひずみ速度になるにしたがいひずみに対し変形抵抗は上昇してくる。

Fig. 6 は、A1100 に比して Cu 以外の成分をほぼ同一とし、Cu を 1.2% 含むアルミニウム合金 (KD) の場合の変形抵抗曲線である。A1100 に比してほぼ 1.3 倍位に

高い変形抵抗を示しているが、その曲線の傾向は他のアルミニウム合金の場合のそれに類似している。

4. 考 察

一般に金属の変形抵抗 K_f は、ひずみ、ひずみ速度、温度の関数として

$$K_f = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$

と表示される。ここで、 ε は対数ひずみ、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度 s^{-1} 、 T は絶対試験温度 °K である。その数学的表示として式(1)が成立つとされている¹⁾。

$$K_f = K_0 \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m e^{A/T} \quad (1)$$

ここで、 n は加工硬化指数、 m はひずみ速度依存指数、 A , K_0 は定数で、 K_0 , A , n , m は材質および変形条件によって決まるものとしている。式(1)を基本とした実験式は、池島²⁾や美坂⁴⁾らの式で、炭素鋼の変形抵抗算出に利用されている。Sokolov³⁾は、動変形抵抗を静的ひずみ速度と動的ひずみ速度との関数として表示し、同様の関係を鋼の場合について木原⁹⁾が提唱している。

Fig. 7 Relation between deformation resistance K_f and strain ε for A1070 at strain rate $\dot{\varepsilon} = 1.5 s^{-1}$.

Table 4 Values of K_n and n in the equation $K_f = K_n \varepsilon^n$.

Material	t °C $\dot{\varepsilon}$ s^{-1}	300			400			500		
		1.5	4.0	12.0	1.5	4.0	12.0	1.5	4.0	12.0
A 1070	n	0.162	0.190	0.207	0.117	0.142	0.180	0.098	0.107	0.152
	K_n	7.21	7.68	8.77	3.85	4.67	5.16	2.35	2.80	3.64
A 1050	n	0.213	0.188	0.203	0.165	0.155	0.179	0.112	0.075	0.107
	K_n	6.58	7.55	8.40	3.85	4.37	5.32	2.34	2.81	3.52
A 1100	n	0.183	0.213	0.195	0.126	0.158	0.173	0.108	0.103	0.113
	K_n	7.58	8.31	9.88	4.65	5.18	6.33	2.77	3.10	3.97
A 3003	n	0.055	0.066	0.075	-0.043	0.000	0.042	-0.014	0.029	0.048
	K_n	8.95	9.82	11.16	5.06	6.19	7.36	3.86	4.33	5.02
A 5052	n	0.122	0.119	0.115		0.083	0.092	0.036	0.032	0.033
	K_n	18.07	18.97	20.54		11.23	12.89	6.09	7.73	8.46
KD	n	0.104	0.114	0.118	0.084	0.031	0.088	0.084	0.073	0.078
	K_n	11.15	11.34	14.48	6.01	5.97	7.90	3.52	4.22	5.30

静的圧縮の結果を考慮する後述の方法は今後検討することとし、動的範囲内の変形抵抗のデータを基にして式(1)に準じた変形抵抗の数式化を以下に考慮する。

4.1 変形抵抗のひずみ依存性

一例として、A1070 の場合について、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.5 \text{ s}^{-1}$ 一定として、 $\ln K_f$ と $\ln \epsilon$ との関係を温度をパラメータとして図示すると **Fig. 7** となる。Fig. 7 から、変形抵抗とひずみとは指数関係にあることがわかり、数学的には式(2)が成立つ。

$$K_f = K_n \epsilon^n \quad (2)$$

ここで、 n は Fig. 7 の直線の傾きで、定数 K_n は材質、ひずみ速度、温度の影響を受け、それらが指定された時に一定値をとる。

本研究のすべての条件における式(2)の定数 n , K_n を **Table 4** に表わす。指数 n は材質、温度、ひずみ速度によって一定の傾向を示さないが、高ひずみ速度、高温などの値は大きく、純アルミニウム系の方がアルミニウム合金系の方より大きな n の値となる傾向にある。 n の平均値を考えると、純アルミニウム系では $n = 0.153$, アルミニウム合金系では $n = 0.067$ と近似でき、それらによ

Table 5 Values of K_m and m in the equation $K_f = K_m \dot{\epsilon}^m$.

Material	$t \text{ } ^\circ\text{C}$	ϵ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
A 1070	300	m	0.041	0.065	0.073	0.081	0.078	0.079
		K_m	4.88	5.28	5.59	5.86	6.18	6.50
	400	m	0.075	0.086	0.102	0.110	0.122	0.128
		K_m	2.90	3.17	3.30	3.37	3.42	3.51
	500	m	0.149	0.169	0.184	0.195	0.196	0.190
		K_m	1.77	1.89	1.92	1.95	1.99	2.08
A 1050	300	m	0.132	0.123	0.109	0.118	0.120	0.128
		K_m	3.86	4.56	5.08	5.25	5.45	5.58
	400	m	0.153	0.133	0.131	0.137	0.154	0.171
		K_m	2.44	2.86	3.06	3.16	3.19	3.22
	500	m	0.207	0.194	0.191	0.197	0.197	0.205
		K_m	1.69	1.87	1.95	1.97	2.00	2.00
A 1100	300	m	0.120	0.117	0.118	0.123	0.125	0.130
		K_m	4.55	5.29	5.72	5.93	6.22	6.40
	400	m	0.103	0.109	0.117	0.125	0.134	0.144
		K_m	3.23	3.60	3.78	3.89	3.95	4.01
	500	m	0.175	0.160	0.168	0.174	0.172	0.177
		K_m	1.94	2.21	2.28	2.30	2.34	2.35
A 3003	300	m	0.082	0.091	0.100	0.102	0.100	0.096
		K_m	7.60	7.88	7.94	8.05	8.21	8.44
	400	m	0.090	0.110	0.132	0.130	0.136	0.163
		K_m	5.33	5.26	5.09	5.12	5.07	4.85
	500	m	0.051	0.085	0.101	0.102	0.099	0.107
		K_m	3.88	3.76	3.70	3.70	3.73	3.74
A 5052	300	m	0.070	0.066	0.065	0.066	0.065	0.062
		K_m	14.42	14.54	15.36	15.70	15.96	16.37
	400	m						
		K_m						
	500	m	0.161	0.160	0.155	0.157	0.158	0.159
		K_m	5.36	5.61	5.72	5.71	5.69	5.74
K D	300	m	0.118	0.109	0.114	0.124	0.124	0.127
		K_m	7.93	8.82	9.12	9.24	9.44	9.63
	400	m	0.136	0.118	0.125	0.128	0.134	0.138
		K_m	4.49	5.07	5.12	5.08	5.19	5.25
	500	m	0.202	0.200	0.199	0.201	0.200	0.195
		K_m	2.66	2.87	2.97	2.99	3.04	3.11

Fig. 8 Relation between deformation resistance K_f and strain rate $\dot{\epsilon}$ for A3003 at strain $\epsilon=0.1$ and 0.6.

Fig. 9 Relation between deformation resistance K_f and $1/T$ (T : absolute temperature) for A1050 at strain rate $\dot{\epsilon}=12 \text{ s}^{-1}$.

る変形抵抗はさほど大きくない。

4.2 変形抵抗のひずみ速度依存性

一例として、A3003 の場合について、ひずみ $\epsilon=0.1$, 0.6 と一定にして、 $\ln K_f$ と $\ln \dot{\epsilon}$ との関係を温度をパラメータとして Fig. 8 に示す。Fig. 8 から実験点が直線で結べることから、ひずみの場合と同様に、

$$K_f = K_m \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

と表わせる。ここで、 $K_m = K_m(\epsilon, T)$, $m = m(\epsilon, T)$ である。2つの定数 m , K_m の値を Table 5 に表わす。 m の値は n の値と同様に、必ずしも一定値を示していないが、純アルミニウム系およびアルミニウム合金系に共通して平均値 $m = 0.128$ と近似することも可能である。

4.3 変形抵抗の温度依存性

Fig. 9 に $\ln K_f$ と $1/T$ の関係を示す。材質 A1050, ひずみ速度 12 s^{-1} の場合の例で、ひずみをパラメータとして表わしている。Fig. 9 によると、低ひずみの場合は、変形抵抗 K_f の対数と温度の逆数は直線関係にあり、

$$K_f = K_f e^{A/T} \quad (4)$$

と表示できるが、高ひずみ、たとえば Fig. 9 で $\epsilon=0.4$, 0.6 の温度 400°C における実験点は直線からはずれてい

ることがわかる。すなわち、高ひずみにおいては式(4)の表示式では必ずしも十分でないことがわかる。もし式(4)が成立つと仮定して、すべての条件について定数を計算し(平均値 $A = 1767$)、その値のばらつきを検討すると、 K_f の値が小さいことより、 A の値の差の違いは大きく K_f の値に影響してくる。

したがって、式(4)はアルミニウム材料の場合の変形抵抗を表示する式と考えることは困難である。ただし、ひずみ速度ひずみが一定で低ひずみの場合には式(4)は成立し、それらに対応した定数 K_f と A を決定することは可能である。

4.4 変形抵抗の総合表示式

4.1~4.3に論じてきた表示式は、仮に n, m, A が一定値で与えられたとしても、 K_n, K_m, K_f はひずみ速度、温度、ひずみのうちの2変数の影響を受け、変形が時々刻々と変形域で進行していくほとんどの塑性加工の場合には実用的でない。圧延においても、ひずみおよびひずみ速度はロール入口からロール出口まで変化するし、圧延作業において、ロール径、圧延速度、圧延温度、材料初期板厚、圧下率などを任意に選んださいの負荷特性を検討するのが一般である点、ひずみ、ひずみ速度、温度をすべて含んだ変形抵抗の総合表示がなされなければならない。

まず始めに、それら3因子の影響を含んだ式(1)についてその妥当性を検討する。前述の平均化された n, m, A の値を採用して定数 K_0 を各材質ごとに求めると

A1070 の場合: $K_0 = 0.272$, A3003 の場合: $K_0 = 0.390$

A1050 の場合: $K_0 = 0.270$, A5052 の場合: $K_0 = 0.667$

A1100 の場合: $K_0 = 0.307$, KD の場合: $K_0 = 0.398$

となる。この場合、 n 値は純アルミニウム系では0.153, アルミニウム合金系では0.067とし、両者に共通して m 値は0.128, A 値は1767とした。これらの実験式を用いた計算値 $K_f \text{ cal}$ と実験値 $K_f \text{ exp}$ とを比較し、誤差 $\phi_1 = (K_f \text{ cal} - K_f \text{ exp})/K_f \text{ exp} \times 100\%$ を調べると、一部に大きな誤差を生じている。特に、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1.5$ と 12 s^{-1} の場合に、材質的にはA1070とKD材の場合に9%以上の誤差が多く生じている。温度に関しては、 400°C の場合に誤差が小さくなっている。A3003とA1100の場合においては誤差は小さく、この両者は本研究範囲において式(1)の総合表示式によりある誤差範囲内で変形抵抗の算出が可能である。

誤差の大きい場合についての原因は、関数 $e^{A/T}$ の表示法と考えられる。すなわち、

- 1) A の値の差が K_f に大きく影響する。
- 2) $\epsilon^n, \dot{\epsilon}^m, e^{A/T}$ の各項で $e^{A/T}$ の値は他項の値に比して大きな値を占める。
- 3) $e^{A/T}$ の関数表示じたいに問題がある。

したがって、式(1)よりより一層誤差が少なく、各材質およびひずみ、ひずみ速度、温度の変化に対しても適用できる実験式の誘導を試みる。

前述のとおり K_f に対して $\epsilon^n, \dot{\epsilon}^m$ の占める割合は $K_0 e^{\Delta/T}$ の占める割合より小さいため、 $K_0 e^{\Delta/T}$ について検討する。今、 K_1 つぎのように定義する。

$$K_1 = \frac{K_f \cdot \exp}{\epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m} \quad (5)$$

Fig. 10 Relation between K_1 and $1/T$ for Al-1.2%Cu Alloy.

Table 6 Values of a, b, c in the equation $K_f = (a + b/T + c/T^2) \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$ when $n = 0.153$ for pure aluminum and $n = 0.067$ for aluminum alloy, and $m = 0.128$

Material	a	b	c
A 1070	6.09	-11.04×10^3	6.40×10^6
A 1050	6.07	-10.23	5.80
A 1100	-5.55	4.90	1.23
A 3003	0.85	-3.23	4.29
A 5052	21.36	-34.35	17.59
KD	15.26	-25.85	12.97

ここで、 n, m に前述の平均値を採用して、式(5)の K_1 と絶対温度の逆数 ($1/T$) との関係の一例を **Fig. 10** に示す。Fig. 10 中の×印は各温度でのひずみ、ひずみ速度によつて変化する K_1 の値の平均値 K_1, m を表わしている。厳密には K_1 はひずみ、ひずみ速度によつて影響を受けるが平均値 K_1, m を採用しても、 K_1 と大きな誤差は生じてこない。この K_1, m を用いれば、 K_1, m は ($1/T$) の 2 次式と近似できることが Fig. 10 から明らかであるので、

$$K_1, m = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} \quad (6)$$

と表示できる。ここで、 a, b, c は材質によつて決まる定数である。したがって、変形抵抗の総合表示式は

$$K_f = \left(a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} \right) \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (7)$$

と簡単に表わすことができる。

n, m に前述の平均値を使用したさいの式(7)の定数 a, b, c の計算結果を **Table 6** に示す。Table 6 の定数による式(7)の計算値と実験値との誤差 ϕ_2 は、式(1)による場合のその誤差 ϕ_1 より小さくなった。このことより、アルミニウム材料の変形抵抗の総合表示式としては、式(7)の表示法が式(1)の表示法より精度がよいと結論される。

さらに精度を上げるために、 a, b, c が各材質による定数であることから、式(7)の n, m も各材質による平均値を採用し、同様の計算により各定数を計算すると **Table 7** の結果が得られる。Table 7 と式(7)の計算式による値と実験値との誤差 ϕ_3 は、前述の 2 つの方法による誤差 ϕ_1 や ϕ_2 より、材質、ひずみ、ひずみ速度、温度の全域にわたつて小さくなった。すなわち、本研究に供したアルミニウム材料において、 $0.1 \leq \epsilon \leq 0.6, 1.0 S^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 12 S^{-1}, 300^\circ C \leq t \leq 500^\circ C$ の実験範囲での変形抵抗の精度の良い総合表示式は式(7)で、その定数は Table 7 となることが明らかにされた。

5. 結 論

純アルミニウム系 3 種 (A1070, A1050, A1100)、アルミニウム合金系 3 種 (A3003, A5052, Al-1.2%Cu) について、熱間動変形抵抗をカムプラストメータで求め、

Table 7 Values of n, m, a, b, c in the equation $K_f = (a + b/T + c/T^2) \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$.

Material	n	m	a	b	c
A 1070	0.151	0.111	6.16	-11.21×10^3	6.51×10^6
A 1050	0.155	0.156	7.94	-12.47	6.40
A 1100	0.152	0.138	-4.72	3.91	1.49
A 3003	0.035	0.104	1.28	-3.80	4.47
A 5052	0.079	0.112	20.06	-32.76	17.31
KD	0.086	0.150	15.26	-25.84	12.94

その数学的モデルについて検討し、ひずみ0.1~0.6、ひずみ速度 $1.0 \sim 12.0 \text{ s}^{-1}$ 、温度 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ の範囲における変形抵抗の総合表示式を得ることができた。

(1) 純アルミニウム系およびアルミニウム合金系の6種の材質についての、温度 ($t = 300, 400, 500^\circ\text{C}$)、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 1.5, 4.0, 12.0 \text{ s}^{-1}$) をパラメータとした変形抵抗-ひずみ ($\epsilon = 0.1 \sim 0.6$) 曲線を得ることができた。

(2) 変形抵抗のひずみ依存性は $K_f = K_n \epsilon^n$ の法則に従い、ひずみ速度依存性は $K_f = K_m \dot{\epsilon}^m$ の法則に従うが、温度依存性は高ひずみにおいて $K_f = K_T e^{A/T}$ の法則には従わない。

(3) n, m の値はそれぞれ材質、ひずみ速度、温度、ひずみの影響を受け一定値ではないが、ある程度の誤差範囲において、純アルミニウム系で $n = 0.153$ 、アルミニウム合金系で $n = 0.067$ 、および $m = 0.128$ と平均値で近似が可能である。

(4) 変形抵抗のひずみ、ひずみ速度、温度に関する総合表示式は、 $K_f = K_0 \epsilon^n \dot{\epsilon}^m e^{A/T}$ では誤差が大きく適用できず、 $K_f = (a + b/T + c/T^2) \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$ による表示式の方が精度がよい。ここで、 a, b, c, n, m は材質による決まる定数で Table 7 に与えられる。

最後に、本研究の実験に協力してくれました佐藤一幸君と高橋俊一君に感謝致します。本研究をまとめるにあたり御助言を賜りました松浦佑次教授および雄谷重夫教授に感謝致します。実験材料につき日軽圧延(株)(北洋一氏)にご支援いただき、カムプラストメータ使用に際し(株)日本軽金属総合研究所(小林啓行氏)にご支援いただきましたこと、各位に深く謝意を表します。また、本研究は、昭和49年度科学研究費補助金一般研究Cの一部を使用して研究したものである。

参 考 文 献

- 1) 井上：鉄と鋼，**41**(1955)，506，869.
- 2) 池島：日本金属学会誌，**17**(1953)，1，25，55.
- 3) 豊島：圧延理論と変形抵抗，誠文堂新光社.
- 4) 岡本，美坂，吉本：塑性と加工，**8**(1967)，414.
- 5) 志田：同上，**10**(1969)，614.
- 6) Alder, J. F. & Phillips, V. A.: J. Inst. Metal, **83** (1954-55), 80.
- 7) Samanta, S. K.: Int. J. Mech. Sci., **11** (1969), 433.
- 8) Sokolov, L. D.: Akademiia Nauk S.S.S.R., **67** (1949), 459.
- 9) 五弓，木原：日本金属学会誌，**31**(1967)，368.