

コニカルカップおよびエリクセン試験による 軽金属板材の高温成形性の評価

日本大学生産工学部 機械工学科
教授 菅又 信
(平成8年度研究開発助成 AF-96009)

キーワード：成形性試験，加熱状態，軽金属薄板

1. 研究の目的と背景

金属薄板材を局部的に加熱してプレス成形における加工限界の向上を図る手法は数多く研究され^{1)~3)}，その技術の一部は既に実用化されている。しかし，加熱状態での成形性に関する基礎的な情報となる，薄板材の均一加熱における成形性を評価した報告⁴⁾は少ない。また，加熱状態における薄板材の成形性試験方法も未確立である。

本研究では，薄板材の常温における成形性を評価する試験法として JIS に規定されている，コニカルカップ試験およびエリクセン試験を加熱状態で行い，高温域における薄板材の成形性評価方法を提案することを目的とした。コニカルカップ試験は薄板材の張出しと絞り変形とからなる複合成形性を評価し，エリクセン試験では張出し変形が支配的な成形性が評価される。それぞれの試験工具および装置を設計製作し，代表的な軽金属材料であるアルミニウム合金板，マグネシウム合金板およびチタン板の成形性に対する成形温度の影響をしらべた。また，各試験材料の高温域における引張特性値を測定し，コニカルカップ値およびエリクセン値との関連性を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 試験工具および試験装置

JIS に規定されているコニカルカップ試験は，0.5 ~ 1.6 mm 厚の薄鋼板の成形性評価を対象としているが，本実験においてはテーパ形状のダイス，ポンチ先端部の寸法，形状は JIS17 型に準じて作製した。すなわち，ダイス穴径は 19.95mm，ポンチ先端の球径は 17.46mm である。

エリクセン試験法はしわ押さえ用の締付け荷重を付加しない A 方式とし，試作した試験工具形状を図 1 に示す。しわ押さえ用の上部ダイスとプランクを押込む下部ダイスは，スライドする 2 本の T 型レールによってかみ合い，両工具の間にはプランク厚さに規定の 0.05mm を加えた 0.85mm の隙間が設けられる。プランクをこの隙間にセットしてポンチによる張出し変形を与える。隙間に挿入されたプランクのフランジ部における変形が拘束されることにより，プランクの下部ダイスへの流入が抑えられる。

いずれの工具とも熱間ダイス鋼 (SKD61) の焼なまし材で作製し，図 2 に示す試験装置の電気炉内にセッ

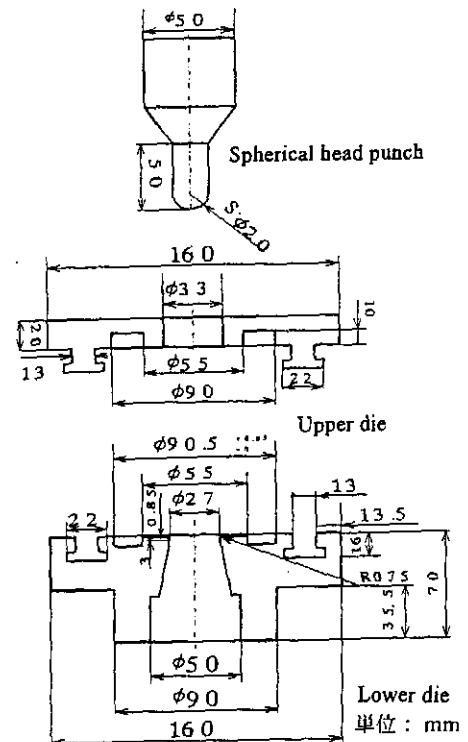


図 1 エリクセン試験工具

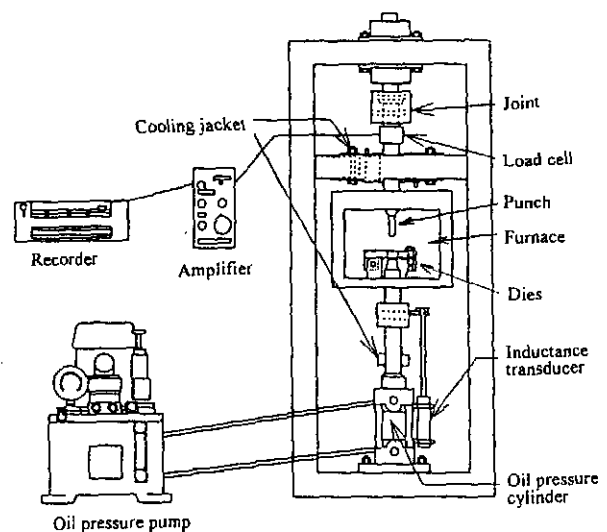


図 2 試験装置の概略図

表 1 試験温度における供試材の引張特性値

| | Tensile Strength (MPa) | | | | Total Elongation (%) | | | | Exponent of Strain Hardening | | | | Lankford Value | | | |
|------|------------------------|-------|-------|-------|----------------------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
| | RT | 373K | 473K | 573K | RT | 373K | 473K | 573K | RT | 373K | 473K | 573K | RT | 373K | 473K | 573K |
| 1100 | 92.7 | 78.7 | 44.7 | 20.2 | 33.6 | 36.4 | 46.4 | 47.7 | 0.25 | 0.22 | 0.17 | 0.06 | 0.80 | 1.06 | 0.85 | 0.57 |
| 3004 | 164.1 | 175.2 | 117.9 | 50.1 | 22.6 | 18.4 | 43.1 | 52.5 | 0.17 | 0.25 | 0.12 | 0.01 | 0.94 | 1.01 | 0.93 | 0.58 |
| 5052 | 200.0 | 209.5 | 125.4 | 66.0 | 23.4 | 24.7 | 51.6 | 54.4 | 0.18 | 0.19 | 0.11 | 0.02 | 0.84 | 0.91 | 0.67 | 0.65 |
| AZ31 | 255.5 | 181.5 | 83.1 | 40.4 | 19.7 | 39.5 | 57.5 | 83.0 | 0.15 | 0.11 | 0.09 | 0.01 | 4.20 | 2.20 | 1.10 | 0.80 |
| Ti | 300.0 | 232.4 | 162.9 | 135.9 | 47.4 | 44.9 | 51.1 | 43.4 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 1.38 | 2.16 | 2.01 | 2.32 |

トした。ポンチを上部の固定軸に、ダイスは油圧シリンダーのロッドに直結した可動軸に取付けた。油圧ポンプの回転数制御によって、ダイスの上方への移動速度を 6mm/min 一定として両試験を行った。上部軸に取付けたロードセルでポンチ力を検出し、ブランクが破断した瞬間に油圧ポンプを停止した。ポンチがブランクに接してから破断までの下部軸の移動を変位計で測定して、ポンチストロークを求めた。コニカルカップ試験では、ダイス内に水平にセットした円形ブランクに、張出し変形部が破断するまでポンチを押込み、コニカルカップ試験を行った。

2.2 実験方法

試験材料の圧延板は、1100、3004、5052 の 3 種類のアルミニウム板、AZ31 マグネシウム合金板(JIS:MP1)、工業用純チタン板(JIS:1 種)の計 5 種類であり、板厚が 0.8mm の完全焼なまし材(O 材)である。板面の結晶粒組織はいずれも等軸粒であり、その平均結晶粒径は、1100 板で 18 μm、3004 板で 29 μm、5052 板で 45 μm、AZ31 板で 14 μm、純チタン板で 36 μm である。JIS に従った円形ブランクの直径は、コニカルカップ試験では 50mm、エリクセン試験では 90mm とし、旋盤によって円周を加工した。試験温度を常温、373 K、473 K、573 K の 4 条件とし、ブランクを試験工具にセットした後、炉内のポンチ、ダイス、ブランクが試験温度に達した時点で試験を開始した。ブランクをセットする際に潤滑剤の黒鉛系グリースをブランクと工具との間に塗布した。ポンチによる張出し変形部分が破断した時のカップ上縁外径を測定してコニカルカップ値を求めた。すなわち、コニカルカップ値が小さいほど成形性が良好である。材料の異方性によってカップ上縁部に耳が生ずる場合には、上縁外径の最大値と最小値の平均値をコニカルカップ値とした。ブランクが破断した時の張出し高さであるエリクセン値は、破断までのポンチストロークを記録して読取った。両試験とも同一条件につき 3 回の試験を行い、その平均値を求めた。

各試験材料の圧延方向に対する 0°、45°、90°方向の引張試験片について、成形性試験と同一の温度における引張特性値(引張強さ、全伸び、加工硬化指数、

塑性ひずみ比)を引張方向の平均値として求めた。なお、加工硬化指数は一樣伸びから算出し、塑性ひずみ比は最大引張応力となる直前の塑性ひずみにおいて求めた。各試験温度に 300s 保持した後、初期ひずみ速度を $1.6 \times 10^{-3} s^{-1}$ としてそれぞれ 3 回の引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性値

表 1 に各試験材料の試験温度における引張特性値を示す。試験温度の上昇とともに、各材料の引張強さは低くなるが、AZ31 板における強度低下が顕著である。試験温度が高くなると、AZ31 板の全伸びは著しく増加するが純チタン板の延性はほとんど変化しない。アルミニウム材料においては、強度が高い材料ほど高温における全伸びの増加量が多い。アルミニウム材料と AZ31 板の加工硬化指数は試験温度が高くなると著しく低下する傾向であるが、純チタン板の加工硬化指数の温度依存性は、この温度範囲においては認められない。純チタン板の塑性ひずみ比は比較的高く、加熱状態では増加する傾向である。アルミニウム材料では、試験温度の上昇に伴って塑性ひずみ比がやや低くなる。AZ31 板は常温では非常に高い塑性ひずみ比を示し、温度上昇にともなう低下量が顕著である。

3.2 コニカルカップ試験

試験温度に対する各試験材料のコニカルカップ値の変化を図 3 に示す。アルミニウム材料では、合金間でのコニカルカップ値に差がほとんど認められない。また、試験温度が高くなってもコニカルカップ値に大きな変化はなく、成形性の温度依存性は少ない。強度が高い 5052 板のコニカルカップ値は、573K でやや小さくなって成形性が向上する傾向である。AZ31 板は常温での成形性に劣っているが、試験温度の上昇と共に成形性が向上し、473 K、573 K ではアルミニウム材料のレベルに達している。純チタン板はすべての温度において他の試験材料より小さいコニカルカップ値を示している。純チタン板の成形性は 473 K 以上では急激に上昇し、573 K では破断することなく絞り抜けて、コニカルカップ値はダイスの直径である 20 mm 以下である。したがって、最密六方晶である AZ31 板と純チタ

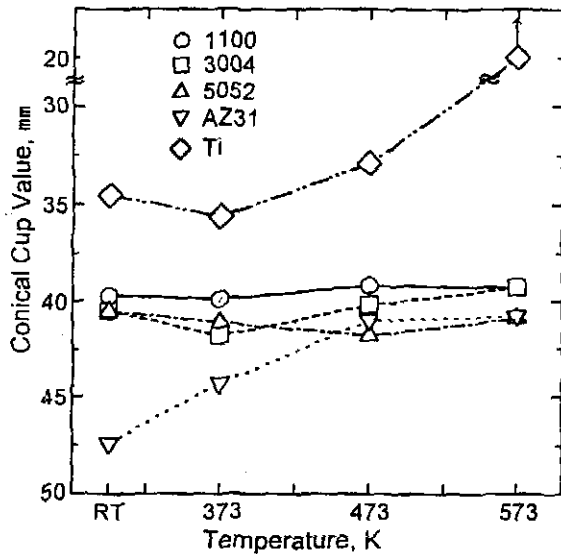


図3 コニカルカップ値の試験温度による変化

ン板は、試験温度が高くなるとコニカルカップ試験で評価される成形性が著しく向上するのに対し、面心立方晶のアルミニウム材料では成形性はほとんど変化しない。

図4に常温における1100板、AZ31板および純チタン板のコニカルカップ試験片を示す。同じ材料の473Kにおけるコニカルカップの形状を図5に示す。1100板では、いずれもポンチによる張出しと、ブランク周辺部の絞り込みが進行した段階で破断している。なお、3004板と5052板は1100板とほぼ同様のカップ形状を示した。図3に示すように常温と473Kにおけるコニ

カルカップ値はほぼ同一であるが、高温ではポンチによる張出し変形部が大きくなる。これは高温では加工硬化指数が低下して変形が局部的に集中しやすくなるためである。いずれも破断部の板厚は薄くなっており、延性破断している。常温におけるAZ31板では、カップ形状を形成する前に破断が生じ、割れはブランクの圧延方向に沿って進行した。しかし、573Kにおいては延性が増加してアルミニウム材料と同じようなカップ形状を示している。純チタン板は強い塑性異方性に伴って、カップ縁に顕著な耳を発生した。耳の発生方向は、常温では圧延方向に対して45°の4方向であり、473Kでは圧延方向に直角の2方向であった。また破断の位置が温度の上昇と共に、ポンチ先端部からダイス穴に引込まれたストレート部分へ移動している。

試験温度に対するコニカルカップ試験片の破断荷重を図6に示す。破断荷重はポンチ力の最高点に対応している。アルミニウム材料の破断荷重は、試験温度が高くなるにつれてやや低下する。引張強さに対応して、1100板<3004板<5052板の順に破断荷重のレベルが高い。常温におけるAZ31板はコニカルカップ形状まで変形する前に破断し、その破断荷重は最も低いが、473Kでは5052板を越える破断荷重となる。さらに高温では変形応力の低下に伴って3004材と同レベルの破断荷重で割れが生じている。純チタン板の破断荷重は、試験温度の上昇と共に著しく低下する。高温域において低い破断荷重を示すことは、高温成形法は成形加工力の低減の利点があると言える。

3.3 エリクセン試験

各試験材料の試験温度に対するエリクセン値の変化

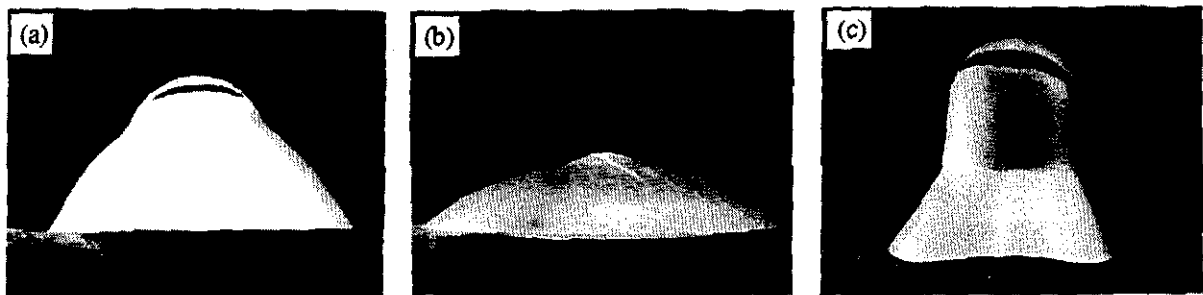


図4 室温におけるコニカルカップ試験後の試験片形状
(a):1100, (b):AZ31, (c):Ti

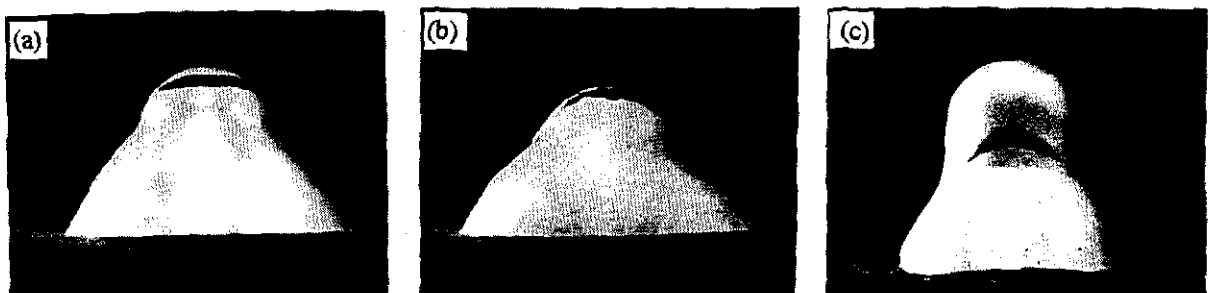


図5 473Kにおけるコニカルカップ試験後の試験片形状
(a):1100, (b):AZ31, (c):Ti

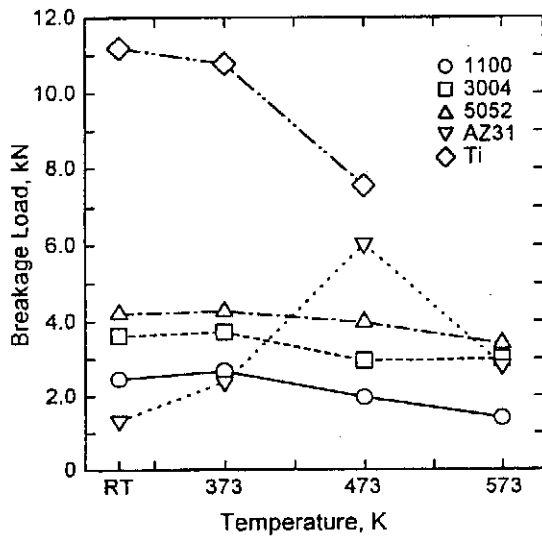


図6 試験温度に対するコニカルカップ試験の破断荷重

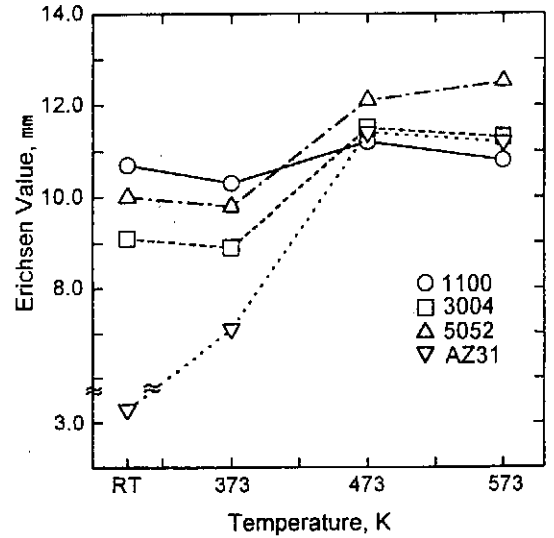


図7 エリクセン値の試験温度による変化

を図7に示す。なお、純チタン板の試験においては、張出し変形によって生じるフランジしわが工具間隙を強い力で押広げようとするため、上下の工具をスライドさせて試験片を工具から取出すことが不可能であった。変形応力が大きい材料の高温エリクセン試験には、試験片の取出しを考慮した工具の改良が必要である。1100-O板の常温におけるエリクセン値として公表されている11.0mm⁹⁾と比較すると、試作したエリクセン試験装置によって、ほぼ正当なエリクセン値が評価できると判断される。アルミニウム材料については、373K

付近でエリクセン値がやや低下して、さらに温度が高くなると上昇する傾向である。試験温度による1100板のエリクセン値の変化は小さく、常温においては他のアルミニウム材料より高いが、473K、573Kでは逆に低くなっている。試験温度が高くなると3004板、5052板とも張出し変形能の向上が認められ、5052板は573Kで最も高いエリクセン値を示す。AZ31板のエリクセン値は、常温においてアルミニウム材料に比べて著しく低いですが、試験温度の上昇につれて飛躍的に高くなり、573Kでは3004板と同レベルに達している。最密六方

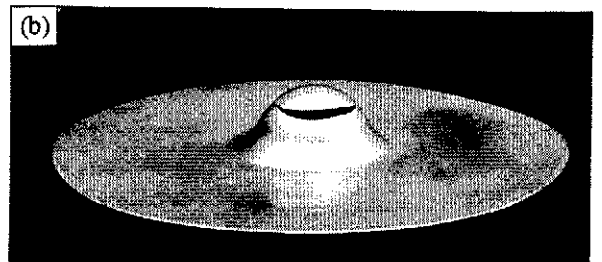
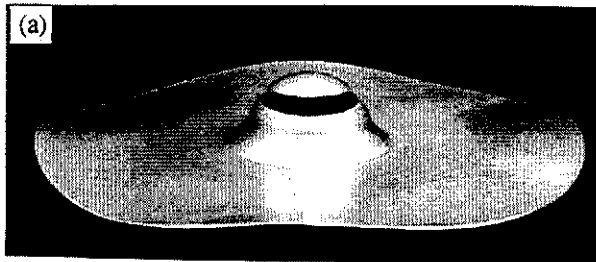


図8 1100材のエリクセン試験後の試験片形状
(a): 室温, (b): 573K

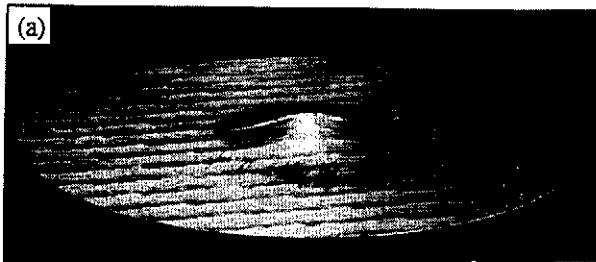


図9 AZ31材のエリクセン試験後の試験片形状
(a): 室温, (b): 573K

晶のマグネシウム合金板では、常温では底面すべりのみに限られるが、温度が高くなると非底面すべり変形も起こり易くなる⁶⁾。AZ31板の常温での塑性ひずみ比の測定値は4.2であり、厚さの減少をともなう張出し形が起こりにくく、そのためエリクセン値は低い。高温になると、非底面すべりも活動するため、塑性ひずみ比は減少し、473Kでは等方的な値である1.1となる。そのためエリクセン値は立方晶のアルミニウム板と同じレベルまで上昇する。

図8および図9に、それぞれ1100板およびAZ31板のエリクセン試験後の試験片形状を示す。AZ31板の表面に見られる縞模様は、板厚を0.8mmとしたフライス加工によるカッターマークである。試験前のblank直径に比べての試験片直径の減少量は、いずれも0.2mm程であり、エリクセン値に大きく影響するような、材料のポンチ変形部への流入は起きていない。アルミニウム材料では1100板に示すように、常温においてもポンチによる張出し変形後に破断したが、図9に示すAZ31板では、ポンチ先端における曲げ変形段階で破断している。しかし、473K以上では図9に示すように、アルミニウム材料と同じような張出し形状が認められた。写真に見られるように、材料とポンチ間の摩擦によって、ポンチ先端部では材料の変形が拘束されるため、変形が進行して板厚が最も薄くなるポンチ肩部で破断が発生する。張出し変形にともなう材料移動によって、フランジ部には円周方向の圧縮力が生じる。残留する圧縮応力によって発生するフランジしわが、図8に示すように常温における試験片に顕著に現れる。高温においてはポンチ力による変形応力が低く、また、残留応力も緩和されるため、フランジしわの発生はほとんど認められない。

エリクセン試験における各試験材料の破断荷重の温度による変化を図10に示す。アルミニウム材料のエリ

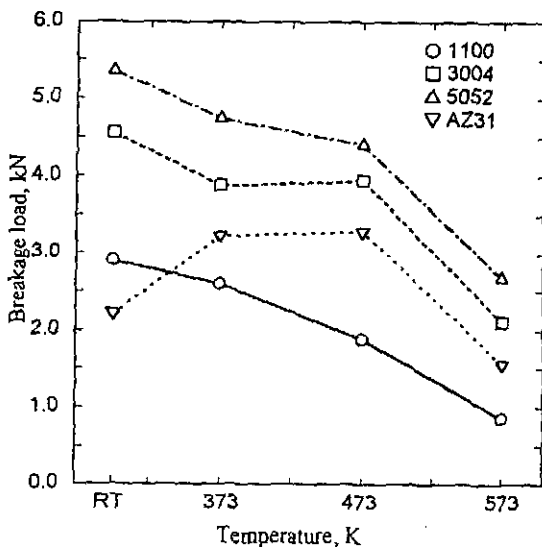


図10 試験温度に対するエリクセン試験の破断荷重

クセン試験における破断荷重は、試験温度の上昇と共に低下した。全ての試験温度において、引張強さが高いアルミニウム合金ほど高い破断荷重を示している。常温におけるAZ31板の破断荷重は、張出し変形することなく破断することに対応して著しく低いが、張出し変形量が多くなるにつれて473Kまでは温度の増加につれて高くなる。さらに高温の573Kでは、材料強度が低下するため、破断荷重が低下する。高温では低い破断荷重で高いエリクセン値を示すことから、張出し成形においては、成形温度を高めることの利点が顕著である。

3.4 成形性と引張特性値の関係

コニカルカップ値と全伸びの関係を図11に示す。図中の記号は材料を示し、記号中には試験温度の区別を記している。AZ31板では、全伸びが約60%までの範囲

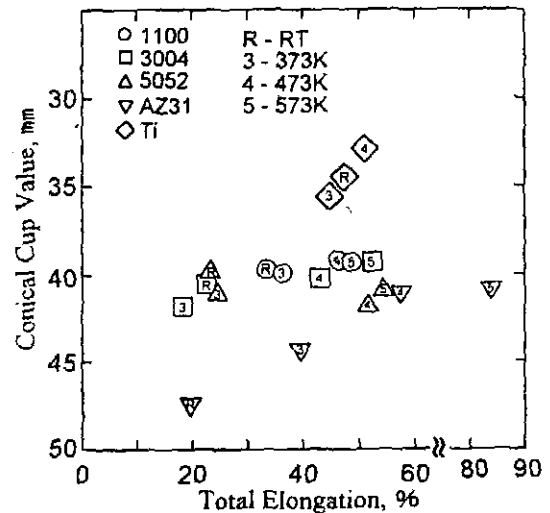


図11 コニカルカップ値と全伸びとの関係

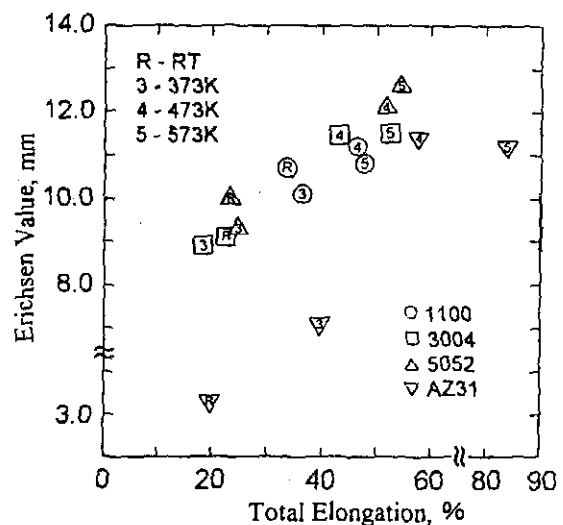


図12 エリクセン値と全伸びとの関係

において両者の間に相関関係が認められるが、全伸びが大きくなるとコニカルカップ値の増加量が少なくなる。アルミニウム板では、合金や試験温度の違いによって全伸びは変化するが、コニカルカップ値の変化量は少ない。純チタン板では全伸びの変化量が少ないが、全伸びが高くなるとコニカルカップ性が向上する傾向が認められる。なお、他の引張特性値とコニカルカップ値の間に相関関係は認められなかった。

エリクセン値と全伸びとの関係を図 12 に示す。各材料においてエリクセン値と全伸びの間には相関関係が認められる。AZ31 板では試験温度の上昇と共にエリクセン値と全伸びが急激に高くなるが、常温から 373K 程度の範囲では、全伸びに比べてエリクセン値の増加量が多い。アルミニウム材料全体では、両者の関係のある領域で示すことができる。エリクセン値と引張強さあるいは塑性ひずみ比との間には弱い負の相関関係が認められた。しかし、エリクセン値と加工硬化指数との間には相関関係が認められなかった。

4. 結言

1) 各種軽金属薄板の高温におけるコニカルカップ値およびエリクセン値を、試作した試験装置によって測定することができた。

2) 1100 板, 3004 板, 5052 板では試験温度の上昇にともなうコニカルカップ値の変化はほとんど認められな
いが, AZ31 板および純チタン板では高温域におけるコニカルカップ値の向上が顕著である。

3) 試験温度が高くなるとアルミニウム材料および AZ31 板のエリクセン値が高くなり, 張出し成形性が良好となる。とくに, 成形温度の上昇にともなう AZ31 板のエリクセン値の向上が著しい。

4) コニカルカップおよびエリクセン試験における試料の破断荷重は高温になると低下し, 高温加熱は成形加工力の低減に効果がある。

5) 全伸びが大きくなるとエリクセン値が向上し, 両者の間に明瞭な相関性が認められたが, 全伸びとコニカルカップ値との相関はゆるやかであった。

5. 謝辞

本研究は, (財) 天田金属加工機械技術振興財団による研究開発助成を受けて遂行されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 戸澤康壽: 塑性と加工, 1-1 (1960), 23.
- 2) 渡辺豊臣: 塑性と加工, 33-375 (1992), 396.
- 3) 阿部佑二, 吉田正勝: 軽金属, 44 (1994), 240.
- 4) 鈴木元治, 金子純一, 菅又 信: 塑性と加工, 28-315 (1987), 375.
- 5) 軽金属協会編: アルミニウムハンドブック(第 5 版), (1994), 99.
- 6) H. Yoshinaga and R. Horiuchi : *Trans., JIM*, 5 (1964), 14.